



**UNIVERSIDAD DE BURGOS**  
**Escuela Politécnica Superior**  
**Departamento de Ingeniería Civil**

**TESIS DOCTORAL**

**EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS FIRMES  
RECICLADOS IN SITU CON CEMENTO**

Autor

**Jesús Díaz Minguela**

Directores

**Hernán Gonzalo Orden**

**Dorys Carmen González Cabrera**

**Burgos, enero de 2011**



## **AGRADECIMIENTOS**

La dedicación a un trabajo de este tipo, absorbe y roba una porción importante del tiempo que hemos recibido. El consumido a mi propia vida, es suplido y compensado por la pasión, el restado a la dedicación a mi familia, quedará para siempre en el debe. Nunca podré compensar la balanza, ellos son la base de mi felicidad y estabilidad que me permite centrar y desarrollar mi vida profesional en trabajos de la importancia del presente.

Tampoco lo hubiera podido realizar sin la ayuda técnica de Hernán Gonzalo y Dorys González, mis guías o directores, la colaboración de Roberto Lorenzo y Javier Monar, la activa aportación de Pablo Murga y Alaitz Linares, quienes con su ilusión juvenil hacen las cosas sencillas, y sin la capacidad editora de Emma.

Para todos ellos mi agradecimiento, ... y mi trabajo.

Jesús Díaz Minguela



## Índice

	Página
CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	9
1.1. Introducción .....	11
1.2. Reciclado y sostenibilidad. Razones para la investigación en este campo.....	15
1.3. Objetivos.....	18
CAPÍTULO 2.- LA TÉCNICA DE RECICLADO IN SITU CON CEMENTO. ESTADO DEL ARTE EN ESPAÑA .....	21
2.1. Breve Reseña histórica.....	23
2.2. Objetivos y ventajas del reciclado.....	25
2.3. Características y propiedades del material .....	28
2.4. Normativa. El dimensionamiento.....	33
2.5. El proyecto .....	37
2.6. Equipos .....	40
2.6.1. Distribuidores de conglomerante .....	40
2.6.1.1. Dosificadores en forma de polvo .....	40
2.6.1.2. Dosificadores en forma de lechada .....	41
2.6.2. Equipos de reciclado .....	41
2.6.3. Equipos recicladores con dosificador de conglomerante incluido .....	42
2.7. El proceso constructivo .....	43
2.8. La experiencia en España.....	48
2.9. Características técnicas de los tramos reciclados .....	52
2.9.1. El tráfico .....	52
2.9.2. Anchura de reciclado .....	53
2.9.3. Secciones de firme existentes .....	53
2.9.4. Secciones de reciclado nuevas .....	54
2.9.5. Equipos .....	54
2.9.6. Curado y protección.....	56
2.10. Los costes.....	56
CAPÍTULO 3.- INVESTIGACIONES PREVIAS. CARENCIAS. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	59
3.1. Análisis de la bibliografía existente .....	61
3.2. Programa experimental de Kolias, Katsakou y Kaloidas .....	63
3.2.1. Programa.....	63
3.2.2. Resultados.....	65
3.2.3. Conclusiones.....	67
3.3. Estudio de testigos tramo Cañaveral sur – límite de provincia de Salamanca. N-630 .....	68
3.3.1. Informe del CEDEX .....	68
3.3.2. Comunicación de J. M. Blanco en las VI Jornadas de Conservación de Carreteras .....	69
3.3.3. Nuevos datos del material reciclado .....	71
3.4. Estudio del tramo Huelva – Cartaya. N-431 .....	73
3.5. Recopilación de datos de obras .....	73
3.6. Carencias. Planteamientos del problema.....	74

	Página
CAPÍTULO 4.- MEDIOS EMPLEADOS, MODELO DE ENSAYO Y PLANIFICACIÓN .....	75
4.1. Material reciclado utilizado en los trabajos .....	77
4.1.1. Cemento .....	79
4.1.2. Agua .....	80
4.1.3. Desencofrante .....	80
4.1.4. Refrentado .....	80
4.2. Equipos .....	81
4.2.1. Estufa .....	81
4.2.2. Básculas .....	81
4.2.3. Moldes .....	82
4.2.4. Amasadora .....	82
4.2.5. Martillo vibrante kango .....	83
4.2.6. Mesa vibrante .....	83
4.2.7. Equipo Proctor modificado .....	84
4.2.8. Cámara de curado .....	85
4.2.9. Equipo de refrentado .....	86
4.2.10. Prensas .....	86
4.2.11. Equipos complementarios .....	89
4.3. Metodología y plan de trabajo .....	90
4.3.1. Metodología .....	90
4.3.2. Planificación temporal y calendario .....	95
CAPÍTULO 5.- DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS REALIZADOS .....	105
5.1. Dosificación del material reciclado .....	107
5.2. Fabricación de probetas .....	110
5.2.1. Ensayos previos para la fabricación de probetas cilíndricas .....	110
5.2.2. Ensayos previos para la fabricación de probetas prismáticas .....	110
5.2.3. Fabricación de probetas cilíndricas .....	114
5.2.4. Fabricación de probetas prismáticas .....	116
5.3. Ensayo de compresión simple .....	119
5.4. Ensayo de tracción indirecta .....	121
5.5. Ensayo de flexotracción .....	122
5.6. Ensayos de fatiga .....	123
5.7. Ensayo de medición del módulo .....	124
5.8. Ensayos de tomografía axial computerizada .....	125
CAPÍTULO 6.- RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS DATOS .....	127
6.1. Ensayos previos de obra .....	129
6.1.1. Resultados resistencia – densidad obtenidos en obra .....	129
6.1.2. Ensayos de dosificación .....	135
6.1.2.1. Dosificación del 2,5% de cemento .....	135
6.1.2.2. Dosificación del 3,5% de cemento .....	136
6.1.2.3. Dosificación del 4,5% de cemento .....	137
6.2. Probetas cilíndricas .....	139
6.2.1. Ensayos de rotura a compresión simple .....	139
6.2.2. Ensayos de rotura a tracción indirecta .....	144
6.2.3. Relación compresión – tracción indirecta .....	146
6.3. Probetas prismáticas. Ensayos estáticos .....	148

	Página
6.3.1. Ensayos de rotura a flexotracción .....	148
6.3.2. Ensayos de rotura a compresión de las medias probetas ensayadas a flexotracción .....	158
6.3.3. Ensayos de rotura a tracción indirecta de las medias probetas ensayadas a flexotracción .....	166
6.3.4. Relaciones entre tipos de resistencia.....	173
6.3.4.1. Relación resistencia a flexotracción – resistencia a compresión.....	175
6.3.4.2. Relación resistencia a flexotracción – resistencia a tracción indirecta .....	184
6.3.4.3. Relación resistencia a tracción indirecta – resistencia a compresión....	191
6.4. Comparativa resultados probetas cilíndricas – prismáticas.....	197
6.5. Probetas prismáticas. Ensayos dinámicos a fatiga .....	201
6.5.1. Ensayos dinámicos de rotura a fatiga.....	201
6.5.2. Ensayos de rotura a compresión de las medias probetas ensayada a fatiga ....	205
6.5.3. Ensayos de rotura a tracción indirecta de las medias probetas a fatiga.....	208
6.5.4. Relación resistencia a compresión – resistencia a tracción indirecta .....	211
6.6. Leyes de fatiga del material reciclado.....	213
6.6.1. Ley de fatiga de las probetas prismáticas ensayadas directamente a fatiga ....	213
6.6.2. Ley de fatiga deducida de los semiprismas rotos a compresión.....	220
6.6.3. Ley de fatiga deducida de los semiprismas rotos a tracción indirecta .....	231
6.6.4. Ley de fatiga del material reciclado .....	237
6.6.5. Comparación de la ley de fatiga obtenida con otras leyes de fatiga.....	239
6.7. Cálculo del módulo de elasticidad del material .....	241
6.8. Resultados de la tomografía axial computerizada.....	248
CAPÍTULO 7.- DIMENSIONAMIENTO DE SECCIONES RECICLADAS IN SITU CON CEMENTO .....	251
7.1. Introducción.....	253
7.2. El tráfico .....	254
7.3. La explanada.....	256
7.4. Capas bituminosas de rodadura.....	257
7.5. Modelos de respuesta.....	258
7.6. Cálculo de secciones recicladas con explanada de buena calidad.....	259
7.7. Análisis de sensibilidad de las secciones a la calidad de la explanada.....	263
7.8. Cálculo de secciones recicladas con explanada de baja calidad.....	268
7.9. Propuesta de un catálogo de secciones de firme reciclado con cemento.....	272
CAPÍTULO 8.- RESUMEN Y CONCLUSIONES .....	277
8.1. Introducción. Razones de la tesis .....	279
8.2. Material reciclado en estudio. Ensayos.....	281
8.3. Resultados de los ensayos.....	282
8.3.1. Ensayos realizados en la obra .....	282
8.3.2. Probetas cilíndricas.....	283
8.3.3. Probetas prismáticas. Ensayos de flexotracción.....	284
8.3.4. Probetas prismáticas. Ensayos dinámicos de fatiga .....	288
8.3.5. Tomografía axial computerizada .....	291
8.4. Leyes de fatiga del material reciclado.....	292
8.5. Módulo de elasticidad.....	296
8.6. Dimensionamiento de secciones. Propuesta de un catálogo .....	296
8.7. Otras líneas de investigación abiertas .....	300
8.8. Conclusiones.....	301

	Página
CAPÍTULO 9.- BIBLIOGRAFÍA.....	305
Anejo 1.- Fichas documentales de las obras realizada en Castilla y León .....	317
Anejo 2.- Cuadros de resultados obtenidos en los ensayos .....	357
Anejo 3.- Cálculos estructurales de las secciones de firme .....	395
Anejo 4.- Fichas de rotura de probetas cilíndricas .....	427
Anejo 5.- Fichas de rotura de probetas prismáticas .....	485
Anejo 6.- Certificados de calidad de los materiales y equipos empleados .....	549

## **CAPÍTULO 1**



## **INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**



# **1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**

## **1.1. INTRODUCCIÓN**

Aunque el empleo en carretera de algunos tipos de residuos se remonta incluso a la construcción de las calzadas romanas, el reciclado de firmes en general es una técnica relativamente joven de rehabilitación de carreteras por la que se consigue transformar un firme deteriorado en una capa de base nueva, de notable capacidad estructural, aprovechando la misma carretera como cantera o fuente de suministro de áridos.

El reciclado puede realizarse en frío o en caliente, según la temperatura de la mezcla y a su vez, en central o in situ según el lugar donde se realice la mezcla. El reciclado en frío in situ puede llevarse a cabo con cemento, con emulsión o mixto con emulsión-cal o emulsión-cemento.

El reciclado in situ con cemento objetivo de esta tesis, consiste en reutilizar los propios materiales existentes en la carretera en cierta profundidad mediante su disgregación, la adición de cemento, agua y a veces un pequeño porcentaje de áridos, e incluso algún aditivo (retardador de fraguado) en unas proporciones definidas en los ensayos previos. Esta mezcla se compacta y se cura adecuadamente constituyendo la capa de mayor resistencia estructural del nuevo firme.

Esta nueva capa, fruto del reciclado de la carretera existente, dispone de una parte granular formada por los áridos de la carretera (macadam o zahorra) más los correspondientes a la capa bituminosa existente (muy variable, desde algunos riegos hasta varias capas de mezcla bituminosa envejecida), que tiene cierto porcentaje de betún residual, junto con los materiales añadidos, como son el cemento, un árido fino (si se requiere corregir la granulometría, la rasante o disponer de mayor espesor) y solo en ocasiones, un retardador de fraguado si la temperatura ambiental muy alta lo requiere.

El producto obtenido en cada uno de los reciclados realizados en España tiene por tanto cierta homogeneidad estructural, pero es muy variable en cuanto a su composición (tipo de árido, porcentaje de cada fracción granulométrica, contenido de betún residual, dotación y tipo de cemento, etc). Por todo ello, a lo que se suma la juventud de esta técnica, es un material objeto de escasas investigaciones, asemejándose en todas sus características al suelocemento, unidad de obra de la que se tiene mayor conocimiento por los estudios realizados y el gran número de obras llevadas a cabo desde los años 70.

En esta tesis doctoral se pretende caracterizar el material, definirlo estructuralmente y determinar los medios de comportamiento de esta técnica, concretando todo ello en una propuesta de catálogo de secciones de firme reciclado in situ con cemento que dependa solo

de las características de la capa inferior de apoyo y la categoría de tráfico pesado que vaya a circular sobre el mismo.

Para ello el plan de trabajo se ha dividido en 3 partes claramente diferenciadas:

1. Una primera parte de análisis de todas las publicaciones disponibles que profundizan en el estudio de este tipo de material, que se complementa con una recogida de información de todas las obras realizadas mediante la técnica del reciclado in situ con cemento en Castilla y León. El objetivo del análisis de esta información es centrarse en estudiar las posibles variables y diferentes alternativas obtenidas en una región concreta aunque tan extensa como es esta comunidad de 94.147 km<sup>2</sup>, dado que la diversidad de toda España hace inviable un espacio tan amplio (no hay que olvidar no obstante que en Castilla y León se han realizado más del 50% de los reciclados llevados a cabo en España). Esta primera parte abarca los capítulos 2 y 3, así como el anejo 1.
2. Una segunda fase de investigación aplicada en el laboratorio con una duración de tres años en la que, con el material extraído del reciclado de una carretera en Salamanca (33% de mezclas bituminosas agotadas y 67% de material granular), al que se le añade un 3,5% de cemento, se han confeccionado:
  - Ciento seis (106) probetas prismáticas de 60 x 15 x 15 cm ensayadas a diferentes edades en cargas de fatiga y cargas estáticas a flexotracción. Los medios prismas resultantes de la rotura se ensayan posteriormente a compresión y tracción indirecta.
  - Sesenta (60) probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 18 cm de altura, de iguales dimensiones a las confeccionadas en las obras, que se han ensayado a compresión y tracción indirecta para correlacionar unas resistencias con otras.

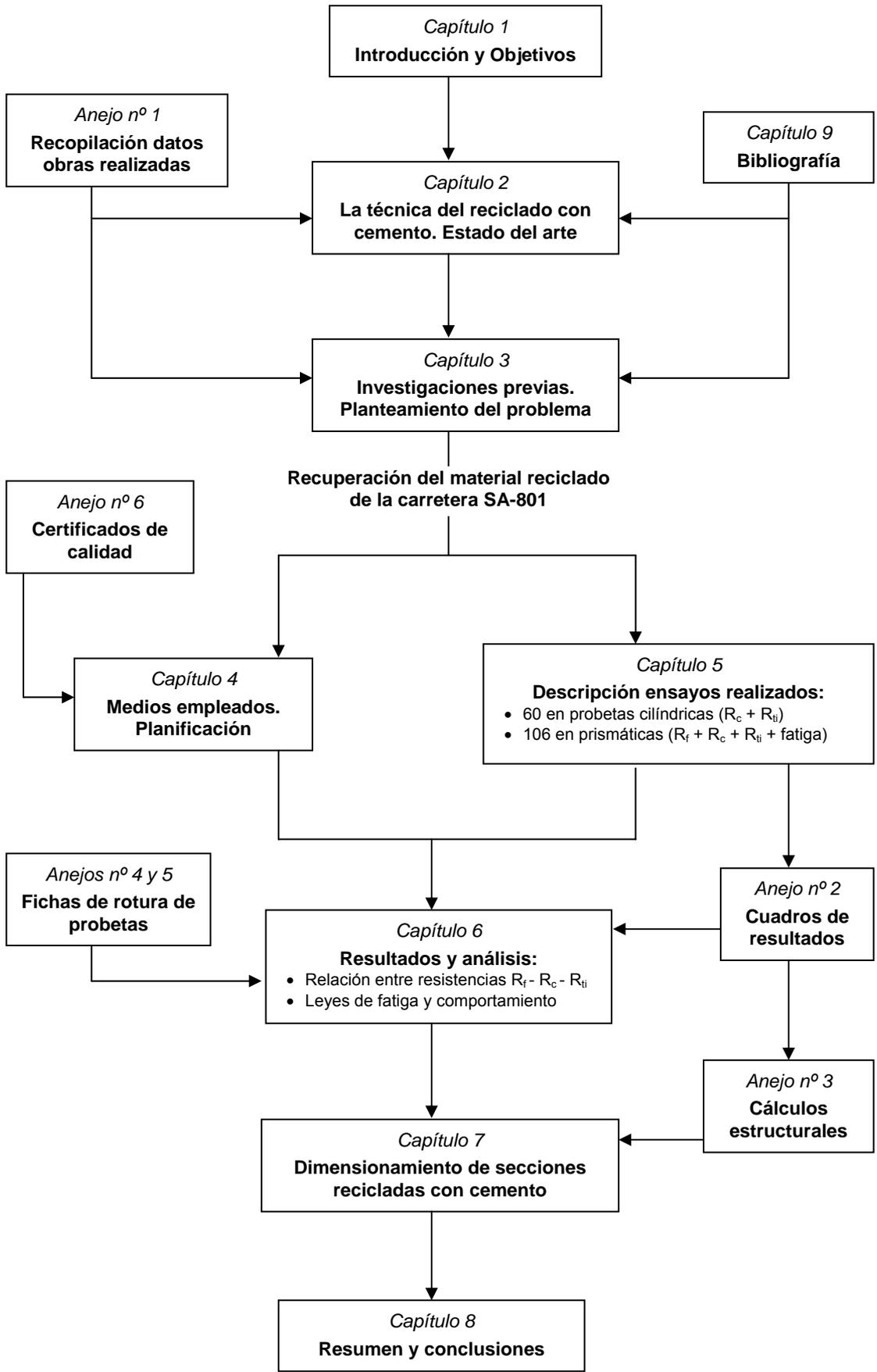
Se pretende en esta fase establecer la relación existente para este tipo de materiales reciclados entre la resistencia a compresión a corta edad, que es la que se determina en el control del material en las obras, la resistencia a tracción y la resistencia a flexotracción a largo plazo, y por último determinar la ley de fatiga que rige el comportamiento estructural del material. Esta segunda parte abarca los capítulos 4, 5, 6 y los anejos 2, 4,5 y 6.

3. Una última parte de cálculo y aplicación de todos los resultados obtenidos en las dos fases anteriores, en la que se pretende obtener los modelos matemáticos de respuesta de este material reciclado, que combinados con los modelos de comportamiento del firme permita optimizar el dimensionamiento de los firmes reciclados in situ con cemento.

Mediante la aplicación de sistemas elásticos multicapa se calculan las secciones de firmes formadas por capas recicladas con cemento y rodadura de mezcla bituminosa equivalentes a las secciones formadas con otros materiales incluidas en la Norma 6.1-IC,

Instrucción de Firmes<sup>(1)</sup>, con el objetivo de proponer un novedoso catálogo, justificado técnicamente, de secciones de firme recicladas in situ con cemento. Este catálogo tendría cabida en la Norma 6.3-IC, Rehabilitación de firmes<sup>(2)</sup>, para todos los casos en los que la deflexión medida en el pavimento es tan elevada, que en los cuadros 5.1 y 2 de dicha Instrucción, se recoge como solución el estudio especial. Esta fase abarca el capítulo 7 y el anejo 3.

Finalmente, tras un capítulo resumen con las conclusiones (capítulo 8) y antes de los 6 anejos, se recoge en el último capítulo, bibliografía, los documentos analizados durante los trabajos.



## **1.2. RECICLADO Y SOSTENIBILIDAD. RAZONES PARA LA INVESTIGACIÓN EN ESTE CAMPO**

El reciclado de firmes in situ con cemento es una técnica que ha evolucionado muy rápidamente en España. De unos 100.000 m<sup>2</sup>/año realizados durante los años 1991, 94 y 97 (387.000 m<sup>2</sup> en 1995) se pasa a reciclar más de un millón de metros cuadrados a partir de 1998 y casi dos millones y medio o más, a partir de 2006<sup>(3)</sup>.

Las razones para optar por la solución reciclado son varias. Normalmente se trata de firmes agrietados o fisurados, prácticamente agotados, bien por el volumen de tráfico pesado soportado que les ha llevado al final de su vida útil de servicio, o bien por problemas de drenaje y plasticidad de los suelos inferiores que ha contaminado las capas del firme que se pretende rehabilitar.

Frente a otras soluciones de rehabilitación, el reciclado de estos firmes con cemento permite el aprovechamiento de estas capas deterioradas, logrando recuperar su capacidad de soporte y unas características físico-mecánicas acordes con los requerimientos necesarios para permitir un adecuado nivel de servicio. Técnicamente, se consigue además un firme en conjunto mucho más duradero, con mucha menor susceptibilidad al agua y mayor resistencia a la erosión.

El reciclado de firmes in situ con cemento está íntimamente ligado al concepto de sostenibilidad, dado que a esta serie de ventajas se suman otras de tipo económico y medio ambiental, que juntas son las que han promovido la aplicación de esta técnica en la mayor parte de España.

En el aspecto económico, cabe destacar la reutilización de los áridos disponibles en la carretera sin tener que aportar nuevos (o solo en un volumen muy reducido), lo que supone un doble ahorro, tanto por su coste en sí, como por suprimir su transporte. Además no hay que instalar central de fabricación como en otras unidades de obra, los rendimientos son elevados y el coste total de la solución reciclado es muy inferior al del refuerzo que dote al firme de la misma capacidad estructural.

En el aspecto ecológico, el aprovechamiento de los áridos existentes en la carretera y utilizados en su día en su construcción, supone importantes beneficios medioambientales. Por un lado, se evita la creación de graveras y canteras o la sobreexplotación de las existentes, reservando la piedra para otras aplicaciones, y por otro, se evita el transporte de dichos áridos, con los impactos colaterales que provoca sobre los caminos y flora adyacentes (polvo, erosiones, etc). Este ahorro de áridos puede estimarse que es del orden de 3.000 a 4.000 toneladas por cada kilómetro que se recicla (comparando con el árido necesario para un firme nuevo con similar capacidad estructural), lo que significa que el reciclado de carreteras in situ con cemento evita la extracción anual de unas 800.000 t de áridos.

A todo ello se suma la ausencia de vertederos debido a la reutilización del material, se evita contaminar los caminos y espacios colindantes con posibles vertidos ocasionados durante el transporte, y se eliminan los impactos ambientales que el mismo ocasiona. Además al ser una técnica en frío, consume poca energía y la carga contaminante es reducida<sup>(4)</sup>.

El empleo de cementos con alto contenido de adiciones (tipos CEM IV y ESP VI<sup>(5)</sup> normalmente) permite una reducción de las emisiones de acuerdo con el protocolo de Kioto y los compromisos de desarrollo sostenible al reducir la cantidad de clinker empleado y permitir incorporar residuos industriales como escorias o cenizas volantes.

Es evidente que la opción de reciclado del firme con cemento tiene una importante y beneficiosa repercusión ambiental, claramente enfocada y directamente comprometida con un desarrollo sostenible.

Este crecimiento constructivo ha ido ligado a un apoyo técnico, arropado por un gran número de Jornadas técnicas (las primeras en Huelva en 1992 y Cáceres en 1995), realizándose en el año 1998 el primer Congreso dedicado a este campo (IV Congreso Nacional de Firmes, Reciclado de Firmes, Segovia) y en el año 2001 el 1<sup>er</sup> Simposio Internacional de estabilización de explanadas y reciclado in situ de firmes con cemento (Salamanca), que tuvo su continuidad en Paris (TREMTEI 2005) y recientemente en 2009 en Antigua Guatemala.

En todos estos foros se abarcan aspectos constructivos, problemas con los equipos y la ejecución, realizaciones de interés y muchos otros detalles, pero apenas hay estudios y análisis del comportamiento del material avalados con los ensayos necesarios.

Algo parecido sucede con la normativa existente, respecto a la que conviene destacar los puntos expuestos a continuación.

El Ministerio de Fomento en su Pliego de Prescripciones Técnicas Generales PG-4, incluye el capítulo 21, reciclado in situ con cemento de capas de firmes<sup>(6)</sup>, publicado en la O.C. 8/2001 de 28 de diciembre, donde se especifican las prescripciones exigidas al material reciclado, pero no se incluye un catálogo o sistema de cálculo, ni ninguna definición de las secciones a reciclar.

La Junta de Castilla y León es el único organismo que dispone de una normativa, las Recomendaciones de Proyectos y Construcción de Firmes y Pavimentos<sup>(7)</sup>, editadas en el año 2004 por la Consejería de Fomento (primera edición en 1996), en el que se incluye un catálogo de secciones que define los espesores de firme a reciclar y los correspondientes a la mezcla bituminosa de rodadura. En dichas Recomendaciones se incluye además un capítulo sobre esta unidad de obra con todos los requisitos que se deben cumplir, recomendaciones constructivas y controles necesarios a realizar.

Pero dicha normativa está basada en la experiencia y en la semejanza del material reciclado con el suelocemento, unidad de la que se tiene mayor conocimiento por el gran número de obras realizadas.

Esta forma de dimensionar los firmes de carreteras de acuerdo a un catálogo de secciones normalizadas es muy útil y práctico, pero debe basarse en un cálculo previo realizado por un método de dimensionamiento analítico.

Si bien el primer catálogo publicado fue el Manual de firmes reciclados in situ con cemento<sup>(8)</sup> del Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA, 1999), este no incluía ningún método de dimensionamiento y el cálculo de las secciones se realizó en base a unas características previas del módulo y resistencia del material reciclado establecidas.

En los métodos analíticos la respuesta del firme, en forma de tensiones, deformaciones o deflexiones de sus capas, se determina a través del uso de modelos matemáticos denominados modelos de respuesta. Estas respuestas se relacionan con el comportamiento de la estructura del firme mediante modelos de comportamiento o deterioro basados en ensayos de laboratorio o en datos de comportamiento en servicio. La observación de dicho comportamiento es necesaria para diseñar firmes de una manera realista.

Los modelos de respuesta son modelos matemáticos que permiten obtener la respuesta estructural del firme (tensiones y deformaciones) sometido a una determinada carga. Actualmente existen modelos de respuesta con diversos grados de complejidad y que se pueden clasificar en dos categorías principales: los basados en la teoría elástica multicapa y los basados en técnicas de elementos finitos.

La mayor parte de los métodos de dimensionamiento que se utilizan habitualmente para el cálculo analítico de firmes semirrígidos se basan en el modelo elástico multicapa desarrollado por Burmister. En los análisis multicapa los materiales de las distintas capas del firme se suponen linealmente elásticos, homogéneos y, en general, isótropos. Los parámetros que intervienen en el análisis son el módulo de elasticidad  $E$  y el coeficiente de Poisson  $\nu$ .

Los modelos de comportamiento se utilizan para simular la evolución, en función del número y magnitud de las cargas de tráfico, de los distintos tipos de deterioros. Se expresan generalmente en forma de relaciones entre las deformaciones o tensiones críticas producidas por las cargas de tráfico y la vida de fatiga del firme en relación con una forma concreta de deterioro. En la mayoría de los métodos de dimensionamiento se considera habitualmente que el deterioro de las capas con cohesión, ya sean de mezclas bituminosas o de materiales tratados con cemento, es debido a un agotamiento estructural por fatiga.

Estos modelos de deterioro se suelen presentar en forma de leyes de fatiga que relacionan el nivel máximo de tensiones de tracción en el material y el número de repeticiones de carga hasta su agotamiento estructural. Las tensiones calculadas se comparan

habitualmente con la resistencia a flexotracción del material. Las expresiones generales presentan la siguiente forma<sup>(11)</sup>:

$$\frac{\sigma_N}{R_F} = 1 + \beta \cdot \log(N)$$

en donde:

$\sigma_N$  = la tensión de flexotracción que provoca la rotura del material después de un número N de aplicaciones de carga.

$R_F$  = resistencia a flexotracción a largo plazo del material.

$\beta$  = coeficiente que depende del tipo de material, normalmente entre 0,065 y 0,085.

N = número de aplicaciones de carga que provoca la rotura.

Tanto en las mezclas bituminosas, como en los materiales tratados con cemento, el comportamiento a fatiga se determina en el laboratorio. Para ello se han realizado ensayos a fatiga con gravasemento, tanto en Francia como en España (Instituto Eduardo Torroja, 1979). Sin embargo, dada la juventud de la técnica del reciclado, no se han llevado a cabo ensayos a fatiga de los materiales obtenidos, asemejándose su comportamiento al suelocemento (del que tampoco se ha determinado la ley de fatiga).

El ensayo de resistencia a rotura a flexotracción es el que mejor reproduce la forma de trabajo del material en el firme al paso de las cargas de tráfico. Sin embargo, la dificultad de confeccionar probetas prismáticas para ser ensayadas a flexotracción, lleva a que esta última se estime en general a partir de correlaciones existentes con la resistencia a compresión, que es la que se mide en las obras.

En consecuencia, para optimizar el dimensionamiento de los firmes reciclados *in situ* con cemento se considera necesario realizar un estudio con los materiales obtenidos en alguno de los reciclados llevados a cabo, que permita su caracterización y la definición de las leyes de comportamiento. Posteriores estudios podrían corroborar las leyes obtenidas para materiales reciclados de otras características diferentes, por ejemplo materiales más flexibles por un mayor contenido de mezclas bituminosas o de betún residual, lo que abre un amplio abanico hacia la investigación.

### **1.3. OBJETIVOS**

El objetivo global de este trabajo es caracterizar el material obtenido del reciclado in situ con cemento de un firme cualquiera de una carretera, con el objetivo final de definir su

comportamiento y corroborar o modificar el catálogo de secciones tipo de firmes reciclados in situ con cemento publicado por la Dirección General de Carreteras e Infraestructuras de la Junta de Castilla y León en sus Recomendaciones de Proyecto y Construcción de Firmes y Pavimentos, y por el Instituto Español de Cemento y sus Aplicaciones (IECA) en su Manual de Firmes Reciclados in situ con cemento, a la vez que se realiza una propuesta de normalización a nivel nacional.

Para ello se definen los siguientes objetivos parciales:

- Estudio de los materiales obtenidos en los reciclados in situ con cemento llevados a cabo hasta la fecha en España, y con mayor detalle en Castilla y León.
- Obtención de las resistencias a corto y largo plazo, tanto a compresión y tracción indirecta como a flexotracción, del material obtenido en el reciclado la carretera SA-801, ya que no se han medido nunca estos valores en España. Las resistencias a largo plazo se estiman siempre por las correlaciones entre las propiedades mecánicas de materiales similares como el suelocemento.
- Correlación entre estas resistencias y la resistencia a compresión a corto plazo (7 días), que es la que usualmente se mide y controla en las obras como parámetro determinante de la calidad de esta unidad.
- Caracterización a fatiga del material reciclado, obteniendo la ley de fatiga del material (que actualmente no se conoce) y comparación con las obtenidas para el suelocemento y la gravacemento (en los que no hay ningún porcentaje de mezcla bituminosa residual).
- Medición de los módulos de rigidez del material
- Caracterización del material reciclado y desarrollo de propuestas que puedan definir un catálogo de secciones de firmes reciclados, optimizando las secciones en función de la categoría de tráfico pesado.
- Mejora del ciclo de vida del firme de la carretera y a través de este, reducción del consumo energético y de materias primas con la promoción de la técnica del reciclado in situ con cemento, contribuyendo así a la sostenibilidad de la carretera en el medio.



## CAPÍTULO 2



### LA TÉCNICA DE RECICLADO IN SITU CON CEMENTO. ESTADO DEL ARTE EN ESPAÑA



## **2. LA TÉCNICA DE RECICLADO IN SITU CON CEMENTO. ESTADO DEL ARTE EN ESPAÑA**

Se intenta recoger en este capítulo toda la información disponible de la técnica del reciclado del firme in situ con cemento, analizando la documentación y normativa existente, los equipos disponibles y el proceso constructivo, así como las características de las obras realizadas hasta la fecha en España.

### **2.1. BREVE RESEÑA HISTÓRICA**

Para asegurar la durabilidad de un firme cumpliendo sus funciones en cuanto a confort y seguridad para el usuario, no solo es importante disponer de una capa de rodadura de calidad, sino que la adecuada capacidad del resto de las capas para soportar las cargas previstas de tráfico resulta imprescindible. La aparición de las bases tratadas supuso un gran avance en este aspecto, al evitar muchos de los problemas ocasionados por las bases granulares en el caso de los firmes flexibles. Buscando nuevos procedimientos para mejorar su capacidad estructural y que permitieran al mismo tiempo abaratar costes y reducir el empleo de nuevos materiales, se empezaron a reutilizar y mejorar las capas del firme ya existente mediante la disgregación del mismo y la adición de un conglomerante.

Desde mediados de los años 80, la opción del reciclado in situ con adición de cemento para el acondicionamiento de carreteras ha resurgido con fuerza y se ha desarrollado con un éxito notable, debido principalmente a tres factores<sup>(8)</sup>:

- un mejor conocimiento de las características mecánicas de los materiales tratados con cemento y del comportamiento de los firmes semirrígidos
- el empleo de nuevos equipos de mayor potencia, rendimiento y profundidad de trabajo, y que proporcionan además una mayor calidad del producto final
- la creciente conciencia ecológica, que ha impulsado esta técnica por los beneficios medioambientales que aporta ante el agotamiento de los yacimientos de áridos existentes y la dificultad de abrir nuevas explotaciones

En la actualidad, el reciclado in situ con cemento es una técnica muy utilizada en países como Estados Unidos, Australia, Sudáfrica, Alemania o Francia. En Alemania, la preocupación por los temas medioambientales ha provocado que se haya impuesto como técnica obligatoria el reciclado de firmes para poder cumplir el Plan General del Gobierno Federal, creado para evitar, reducir y reutilizar escombros y residuos asfálticos. Un proceso similar ha sucedido en Sudáfrica<sup>(9)</sup>, país de larga experiencia en estabilizaciones, donde esta técnica se ha impuesto por sus ventajas a pesar de no estar incluida en los catálogos normalizados, o en Inglaterra<sup>(10)</sup>, donde se normalizó hace ya tiempo.

En lo que respecta a España, el reciclado de firmes in situ comenzó a aplicarse a principios de los años 80 a pavimentos bituminosos deformados. Se empleó la técnica del reciclado en caliente, con varios inconvenientes y con resultados poco satisfactorios, por lo que dicho método se abandonó, hasta 1995 en que se volvió a utilizar en la autopista Vasco-Aragonesa. Como consecuencia de esos problemas no resueltos en los años 80, a partir de 1991 empezaron a considerarse las técnicas de reciclado en frío, tanto con emulsión como con cemento.

La primera rehabilitación con cemento se realizó en una longitud algo superior a 12 km en la N-431, entre las localidades de Huelva y Cartaya. Dicha obra lleva en servicio desde principios del año 1992.

Partiendo de esta primera experiencia de casi 100.000 m<sup>2</sup> de reciclado, y tras un pequeño salto en los años 93 y 96 en los que se diseñan otras nuevas actuaciones, el número de carreteras rehabilitadas mediante la técnica del reciclado in situ con cemento ha ido creciendo de forma considerable, sobre todo a partir del año 98, en el que se reciclan un total de 12 tramos repartidos por toda la geografía española y que suman una superficie total aproximada de 979.300 m<sup>2</sup>. Así, en el año 99 se realizan también 25 actuaciones (1.217.800 m<sup>2</sup>), en el 2000 otros 20 tramos que suman aproximadamente 1.547.700 m<sup>2</sup>, 26 más en el año 2001, que suman 1.378.050 m<sup>2</sup>, en el 2002 se han reciclado 1.144.780 m<sup>2</sup> de firme y en 2003 un total de 1.495.800 m<sup>2</sup> (12). En el año 2004 se ha reciclado aproximadamente 1.281.000 m<sup>2</sup>, en el 2005 unos 1.507.500 m<sup>2</sup>, en el 2006 la superficie reciclada se incrementó a 2.642.000, que se mantiene con unos 2.532.700 m<sup>2</sup> en el 2007, en 2008 con 2.118.300 m<sup>2</sup> y en el 2009 con 2.435.400 m<sup>2</sup> de firme reciclado. Esto hace una superficie total de carreteras recicladas in situ con cemento en el año 2009 en toda España de casi 21 millones de metros cuadrados (20.967,4 mill m<sup>2</sup>) (13).

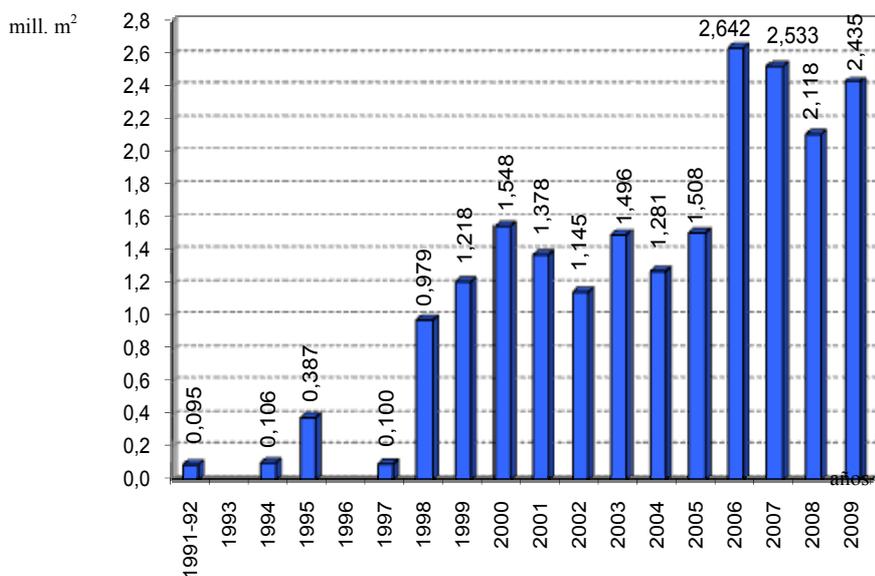


Figura 1. Superficie anual reciclada en España (m<sup>2</sup>)

De todos ellos, un 49% de los tramos reciclados hasta el año 2002 y un 52,2% de los tramos reciclados en los cuatro últimos años (2006 a 2009) se han construido en Castilla y León, comunidad en la que esta tecnología encuentra un considerable apoyo como una importante alternativa al sistema clásico de rehabilitación de firmes mediante el extendido de capas de mezcla bituminosa, por sus importantes ventajas técnicas y medioambientales.

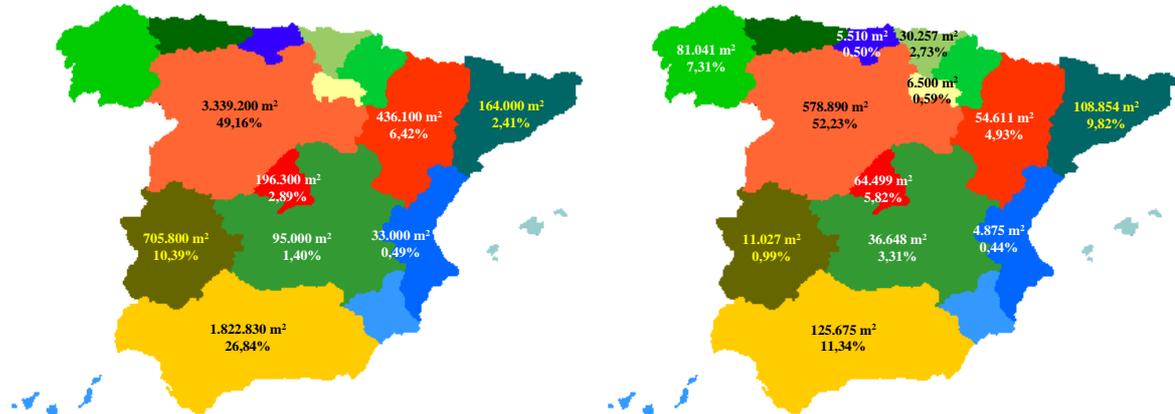


Figura 2. Distribución geográfica de la superficie reciclada en España hasta el año 2002 y en los cuatro últimos años (2006 a 2009)

Actualmente en España hay disponibles más de 60 equipos especializados en el reciclado con cemento de firmes, propiedad de un elevado número de empresas dedicadas a este campo, lo que da una idea de lo mucho que esta tecnología ha crecido en nuestro país.



Foto 1. Reciclado en la Sierra de Gredos

Si bien, en un principio, fue la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento quien inició esta técnica con un reciclado en Huelva, pronto la Comunidad Autónoma de Castilla y León recogió el relevo y tomó la iniciativa, con un gran número de obras. A esta se sumaron otros organismos autonómicos y provinciales de otras comunidades como Andalucía, Extremadura, Madrid, Valencia y Aragón con un gran número de realizaciones, que han situado a España a la cabeza de esta tecnología.

## 2.2. OBJETIVOS Y VENTAJAS DEL RECICLADO

El objetivo fundamental de un reciclado de un firme es recuperar o mejorar sus características y comportamiento bajo tráfico. Específicamente, se pueden enumerar los siguientes objetivos parciales:

- transformación de un firme degradado y heterogéneo en una estructura resistente y más homogénea
- incremento de la capacidad de soporte, adaptándola a las solicitaciones del tráfico
- incremento de la durabilidad: menor susceptibilidad al agua y mayor resistencia a la erosión
- protección de la explanada y de las capas inferiores del firme, cuyas características son a veces deficientes.

El procedimiento del reciclado compite con la técnica clásica de rehabilitación mediante el refuerzo del pavimento existente con mezclas bituminosas. Ambos métodos tienen los mismos objetivos de incrementar la capacidad estructural del firme, pero el reciclado aprovecha los materiales existentes y modifica menos la rasante.

Entre las ventajas que aporta el reciclado de firmes in situ con cemento cabe destacar las siguientes<sup>(14 y 15)</sup>:

#### 1. Ventajas técnicas

- permite rehabilitar un firme fatigado, deformado e inadecuado al tráfico que debe soportar logrando una capa tratada homogénea, estable y de espesor importante, con unas características mecánicas importantes.
- disminuyen las tensiones que llegan a la explanada y las que se producen en las capas superiores bituminosas.
- Se reducen los efectos negativos que sobre el firme tienen los cambios de humedad del soporte.
- aprovechamiento de los materiales envejecidos, contaminados o de características inadecuadas del firme existente.
- homogeneización resistente y geométrica del firme.
- posibilidad de rehabilitar carriles individuales, aspecto muy importante en calzadas de sentido único y dos o más carriles, donde los deteriorados pueden ser sólo los exteriores por soportar el tráfico pesado.
- permite mantener la rasante inicial, reduciendo el recrecimiento de arcenes y bordillos, así como la disminución del gálibo en pasos inferiores.
- disminución de molestias por el tráfico de obra, y menores posibilidades de causar deterioros a la red de carreteras secundarias adyacente debido al volumen más

reducido de transporte de nuevos materiales y la no necesidad de transportar los materiales a una central de fabricación.

- puede realizarse simultáneamente la ejecución de un ensanche, lo que es de gran interés en los casos frecuentes en los que se combina la rehabilitación del firme existente con el ensanche del mismo. Con los equipos de reciclado y utilizando materiales similares a los del firme a reciclar se puede evitar la construcción de cuñas estrechas de ensanche, la cual suele acarrear dificultades. Por otra parte, no se precisa un ancho mínimo de ensanche. Todo ello se traduce en un mayor aprovechamiento del firme existente. Finalmente, las características del material del ensanche suelen ser más parecidas a las del firme reciclado que a las de un refuerzo sobre la calzada existente.

## 2. Ventajas económicas

- la reutilización de los materiales in situ supone un importante ahorro, al disminuir al mínimo el volumen necesario de nuevos áridos a utilizar en la obra y el coste de su extracción, trituración y clasificación.
- no es necesario instalar una central de fabricación, ni realizar el transporte (gasóleo, aceites, desgaste de vehículos, etc).
- menores costes de rehabilitación del firme en antiguas carreteras agotadas.
- Se reduce el tiempo de construcción y el de afección al tráfico
- las ventajas técnicas ya citadas también se traducen en ventajas económicas.

## 3. Ventajas ecológicas<sup>(16)</sup>

- la reutilización de materiales in situ contribuye a no tener que abrir nuevos yacimientos de áridos, ni a reducir las reservas de los existentes. Tampoco son necesarios vertederos, al no producirse sobrantes por el aprovechamiento de los materiales existentes.
- Al evitar transportes, se reducen las emisiones de CO<sub>2</sub> y se eliminan los impactos colaterales que provoca sobre los caminos y flora adyacentes (polvo, erosiones,...).
- es una técnica en frío (el proceso se realiza a temperatura ambiente) y por tanto consume poca energía.
- se disminuye notablemente el deterioro de la calidad del aire de otras soluciones, al reducir la contaminación y las emisiones de vapores nocivos.
- Se evitan los daños que una central de fabricación puede ocasionar (eliminación capa vegetal, modificación del drenaje, contaminación acústica, polvo, etc).

En resumen, el reciclado es un método de construcción eficiente en cuanto al empleo de recursos y de energía, que contribuye a preservar el medio ambiente <sup>(17)</sup>, y al mismo tiempo económico, al reutilizar todos los materiales y reducir los costes del transporte.

En cuanto a las limitaciones o inconvenientes que pueden surgir en el reciclado de un firme hay que señalar:

- Si el firme existente resulta heterogéneo por tramos, el reciclado puede resultar con mayor heterogeneidad que una mezcla nueva.
- La ejecución por bandas podría provocar ocasionalmente la aparición de grietas longitudinales si no se adoptan las precauciones pertinentes para garantizar una adecuada unión entre los materiales de bandas adyacentes

### **2.3. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DEL MATERIAL**

El conocimiento de las características mecánicas de los materiales reciclados es indispensable para efectuar el dimensionamiento del firme, y por tanto, para determinar el espesor a reciclar necesario y el de la capa o capas de mezcla bituminosa a disponer encima del mismo. Sin embargo a penas se han realizado estudios al respecto estimándose, previo a la ejecución del reciclado, las características mecánicas del material una vez tratado.

Esta es una de las mayores dificultades de la técnica del reciclado, ya que se parte de materiales relativamente heterogéneos y no es posible conocer bien a priori la disgregación real que se obtendrá en obra. Por otra parte en obra no es posible ir modificando continuamente las fórmulas de trabajo para acomodarlas a las variaciones en la granulometría y otras características de los materiales in situ.

De forma práctica, se elige una composición media de la mezcla, y se determina en el estudio las variaciones en las características mecánicas resultantes de las desviaciones de los materiales in situ con respecto a dicha composición media. Si el firme a tratar es heterogéneo y la obra tiene suficiente longitud, puede dividirse en pequeños tramos, en los cuales es posible estimar mediante un estudio de laboratorio las características del material después de ser reciclado, con las naturales dispersiones introducidas por el proceso de puesta en obra.

Se suelen adoptar criterios de diseño basados en resistencia a compresión a los 7 días superiores a 2,5 MPa con dotaciones superiores al 3% de cemento y un módulo de elasticidad de 6.000 MPa. Pero estos valores son solo orientativos, factores tales como la mayor o menor proporción de mezcla bituminosa en el espesor reciclado tienen una gran influencia en el resultado. En general, cuanto más elevado es el contenido de betún, más reducido es el módulo de elasticidad en relación con el de una gravacemento con la misma resistencia, lo cual es favorable para el comportamiento a fatiga del firme reciclado.

La adición del cemento en el firme cuando se recicla, modifica y mejora prácticamente todas sus características, pero de manera muy significativa hay que destacar 2 de ellas<sup>(18)</sup>:

- el endurecimiento de la mezcla
- la reducción de la sensibilidad al agua

El desprendimiento de CaOH que tiene lugar durante la hidratación del cemento produce la floculación y estabilización de las partículas arcillosas que estén presentes en los materiales granulares del firme, impidiendo de forma definitiva que vuelvan a experimentar cambios de volumen y de capacidad de soporte. La reducción de la sensibilidad al agua puede tener una importancia considerable en el comportamiento futuro del firme.

Pero el efecto más importante es el fraguado, que consiste en la formación, en presencia de agua, de silicatos y aluminatos de calcio, que dotan al conjunto de una gran cohesión y estabilidad, además de una apreciable resistencia mecánica. Los silicatos son estables y poco solubles en agua, y la reacción es progresiva e irreversible. El resultado es un material capaz de resistir los esfuerzos de flexión generados por la acción de las cargas del tráfico y muy adecuado para capas de firme.

El comienzo del fraguado y la velocidad con que se desarrolla dependen de la naturaleza de los constituyentes (cemento y áridos del firme) y de la temperatura a la que se produzca el proceso, pero en cualquier caso se empieza a producir a las pocas horas del mezclado y se extiende durante un periodo de tiempo que puede durar varios meses. Las características mecánicas del material endurecido se pueden controlar variando el contenido de cemento o actuando sobre otros factores relacionados con los componentes, de manera que para una obra determinada se obtengan las resistencias deseadas, dentro de un tiempo también prefijado. Pero las mejores características del material reciclado se obtendrán cuando la mezcla se compacte adecuadamente y con un contenido de humedad que facilite la densificación del material.

Una vez realizada la mezcla del firme de la carretera con el cemento y el agua, el producto debe presentar unas determinadas propiedades en estado fresco. Por un lado, ha de permanecer trabajable durante cierto tiempo para permitir su puesta en obra y su compactación sin que el endurecimiento del mismo las dificulte o impida. Por otro lado, a veces se hace necesario que, tras ser compactado, el material posea una estabilidad suficiente para permitir la apertura al tráfico sin que las deformaciones producidas por las cargas de los vehículos rompan los enlaces creados entre las partículas de material granular (estabilidad inmediata).

En cuanto a las propiedades mecánicas, como se ha citado, para poder dimensionar el firme reciclado es necesario evaluar el comportamiento mecánico de los materiales que integran su estructura, y para ello se requiere el conocimiento de cuatro parámetros fundamentales:

- La resistencia a la rotura, que indica la máxima tensión que puede soportar el material sometido a una carga estática.
- El módulo de elasticidad, que representa la relación entre la tensión aplicada y la correspondiente deformación unitaria. Es indicativo de la deformabilidad del material y de su capacidad de reparto de tensiones, tanto hacia las capas inferiores, en caso de existir, como a la explanada. A igualdad de espesor, cuanto mayor es dicho módulo, las deflexiones que se originan son más reducidas y uniformes, sin valores máximos acusados bajo los puntos de aplicación de las cargas.

En general, los materiales tratados con cemento presentan un comportamiento elástico marcadamente lineal al menos hasta alcanzar un porcentaje importante de su tensión de rotura, y su módulo de elasticidad puede considerarse prácticamente constante en el rango de tensiones dentro del cual suelen trabajar.

- El coeficiente de Poisson, que representa la relación entre la deformación transversal y la deformación axial del material, al aplicarle una carga también axial.
- La resistencia a fatiga, que representa la capacidad del material para soportar la aplicación repetida de cargas inferiores a la de rotura sin que se agriete. Esta característica se define mediante leyes que relacionan las tensiones que se producen en el material por una determinada carga con el número de repeticiones de la misma que admite el material hasta su rotura.

Los materiales tratados con cemento están sujetos a fenómenos de fatiga, es decir, que, para solicitaciones repetidas, la rotura se produce para una tensión inferior a la que produce la rotura bajo carga estática. Dado que el tráfico actúa por repetición de cargas, resulta fundamental conocer la relación entre las tensiones soportadas y el número de repeticiones de estas solicitaciones que producen el agrietamiento del material (ley de fatiga).

El comportamiento real del material indica la existencia de un umbral de fatiga, es decir, que por debajo de un determinado valor de la tensión repetida que soporta el material (normalmente en torno al 40 - 50% de su resistencia a flexotracción), el material podría soportar teóricamente un número infinito de aplicaciones de la carga que la provoca.

A partir de los tres primeros parámetros se puede estimar la respuesta del material, en tensiones y deformaciones, ante una determinada solicitación. Con el cuarto parámetro se estima el número de aplicaciones de carga necesario para que se agriete.

Las propiedades mecánicas de los materiales reciclados con cemento dependen, no sólo de las características y proporciones de los materiales constituyentes, sino también de su edad y de las condiciones de humedad y temperatura a las que hayan estado sometidos

durante su fraguado y endurecimiento. Sin embargo, a diferencia de los materiales bituminosos, no se ven prácticamente influidas ni por la temperatura a la que se encuentra el material, ni por la velocidad de aplicación de la carga.

En el presente estudio se analizarán todas estas propiedades mecánicas del material del firme reciclado con cemento. Dichas características y sobre todo las resistencias están influidas por los siguientes factores:

- El contenido y tipo de cemento, considerando que al aumentar este se crea un mayor número de enlaces entre partículas y directamente se incrementan las resistencias, en mayor medida cuanto mejor estructura granular tenga el material. Además cuanto mayor sea el contenido de adiciones activas del cemento, mayor es la relación entre las resistencias a corto y a largo plazo.
- La humedad de la mezcla: Al aumentar el contenido de agua de un reciclado con cemento entran en juego dos factores contrapuestos: por una parte, se aumenta la relación agua/cemento, lo que tiende a disminuir las resistencias mecánicas, pero por otra se aumenta la densidad, hasta alcanzar la humedad óptima, y con ello la resistencia. Normalmente, la resistencia máxima de un firme reciclado con cemento se obtiene con una humedad algo inferior a la óptima de compactación.
- La densidad alcanzada en la compactación, existiendo una gran relación entre la densidad de compactación y la resistencia alcanzada ya que los huecos existentes en los materiales mal compactados constituyen puntos débiles por donde se puede iniciar la rotura del material. Un descenso reducido en la densidad de compactación se puede traducir en una disminución importante de la resistencia.
- La naturaleza y granulometría de la capa reciclada y sobre todo el porcentaje (espesor) de la capa bituminosa reciclada: la disponibilidad de un material de firme con un esqueleto mineral formado por buenos áridos tiene una contribución muy importante a la resistencia mecánica. Por otro lado la aportación de material bituminoso reduce la rigidez (módulo) del material obtenido.
- La edad del material: la variación de la resistencia con la edad guarda una relación lineal con el logaritmo de esta última. Además, la pendiente de la curva aumenta al crecer el contenido de cemento.
- Las temperaturas a las que se ha visto sometido durante el fraguado: La resistencia del firme reciclado con cemento aumenta al ir progresando las reacciones de hidratación del conglomerante. A su vez, el ritmo de desarrollo de estas últimas en la etapa inicial se incrementa con la temperatura. No obstante, el fraguado de los materiales del firme mezclados con el cemento en el reciclado se puede ver retardado, e incluso detenido, cuando tiene lugar en periodo de heladas, debido entre otras causas a que las reacciones

químicas que dan lugar al mismo dependen de la temperatura. Por otra parte, la acción expansiva del agua intersticial puede dar lugar a una descompactación del material.

A largo plazo, una vez que el material reciclado ha sido recubierto con una capa bituminosa, los movimientos de las fisuras, debidos a las variaciones diarias o estacionales de la temperatura, pueden iniciar a su vez fisuras en la mezcla bituminosa y provocar su propagación hasta la superficie de la carretera (fenómeno de reflexión de grietas) dependiendo siempre de la situación climática y de la intensidad de tráfico pesado circulante. El fenómeno se puede evitar si el material tratado se prefisura a distancias cortas cuando el tráfico que circule sea de una categoría superior a T2 y/o el gradiente térmico sea muy acusado.

Por último, las propiedades térmicas de los firmes reciclados con cemento tienen un gran interés, puesto que de sus valores dependen:

- El desarrollo de gradientes de temperatura en las capas del firme recicladas, provocados fundamentalmente por los cambios de temperatura entre el día y la noche.
- Los cambios de longitud entre verano e invierno en las “losas” en que queda dividida la capa de material reciclado, que dan lugar a una mayor o menor abertura de las juntas y grietas de retracción. Y, por lo tanto, las tensiones de origen térmico.

Todos estos fenómenos tienen una gran influencia tanto en el desarrollo de fisuras en las capas recicladas con cemento, como en su posible reflexión en las capas superiores de mezcla bituminosa. Algunos de los valores medios de los parámetros térmicos de otros materiales similares tratados con cemento (sin aportación de betún) son:

Tabla 1. Valores aproximados de los parámetros térmicos de algunos materiales tratados con cemento.

PARÁMETRO TÉRMICO	VALORES APROXIMADOS	
Coef. de dilatación térmica	$0,6 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$	árido calizo
	$1,3 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$	árido silíceo
Conductividad térmica	$1,5 \text{ W}/^\circ\text{C}\cdot\text{m}$	gravacemento
	$1,15 \text{ W}/^\circ\text{C}\cdot\text{m}$	suelocemento
Calor específico	840 – 1170 J/kg.°C	
Difusividad térmica	$3 - 6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$	

El coeficiente de dilatación térmica, el cual depende fundamentalmente de la naturaleza de los áridos, es uno de los factores que más influye en los cambios dimensionales de los materiales reciclados con cemento. Los áridos calizos presentan los valores más bajos para este parámetro y por tanto se ven menos afectados por las variaciones térmicas.

A los cambios dimensionales originados por las variaciones de temperatura entre día y noche o entre verano e invierno (retracción térmica), se suma otra retracción de menor importancia (retracción hidráulica) debido a la pérdida paulatina de agua como consecuencia de los procesos de hidratación y de secado durante el fraguado y endurecimiento de los materiales del firme reciclados con el cemento. El valor de ésta depende de factores tales

como el contenido de cemento, el tipo de suelo o material granular, el contenido de agua, el grado de compactación y las condiciones de curado del material.

Los cambios dimensionales que se producen en los materiales tratados con cemento, ya sean por retracción hidráulica o térmica, tienen una gran influencia en el fenómeno de su fisuración. Los cambios volumétricos debidos a la retracción provocan la fisuración inicial del material que se produce a edades tempranas, mientras que los debidos a gradientes térmicos provocan la apertura de estas fisuras y su reflexión a las capas superiores de mezclas bituminosas. El fenómeno se produce de la siguiente manera:

Durante el fraguado inicial del material se produce una contracción por pérdida de agua y temperatura. El movimiento de retracción hace que aparezcan esfuerzos de rozamiento entre la capa y su soporte. Cuando estos esfuerzos igualan o superan la resistencia a tracción del material reciclado con cemento, que a edades tempranas es muy reducida, se produce la fisuración en losas. Por lo tanto, la resistencia a tracción, el coeficiente de rozamiento con el soporte y la densidad del material son los elementos que influyen de manera esencial en la iniciación de las grietas de retracción.

#### **2.4. NORMATIVA. EL DIMENSIONAMIENTO**

Para diseñar el firme de las primeras realizaciones (1991-1995) en España se emplearon programas analíticos de cálculo basados en su asimilación a un medio multicapa elástico y lineal, comparándose posteriormente las soluciones diseñadas con las alternativas de refuerzo. En estas primeras secciones, la tendencia era mantener espesores de reciclado entre 25 y 30 cm según el volumen del tráfico pesado, colocando como rodadura una única capa de mezcla bituminosa de 5 o 6 cm, que en el caso de los tráficos más reducidos se fabricaba en frío, y doble capa hasta 10 cm en el caso de los tráficos mas pesados.



Las secciones tipo de firme, para carreteras nuevas y ensanches, estaban entonces normalizadas en España en la Instrucción 6.1 y 6.2-IC<sup>(19)</sup>, de mayo de 1989, que lógicamente no recogía la solución reciclado (opción que tampoco se incluye como sección tipo en las vigentes Instrucciones 6.1-IC, secciones de firme y capas estructurales de firmes<sup>(1)</sup> y 6.3-IC, rehabilitación de firmes, del Ministerio de Fomento<sup>(2)</sup>).

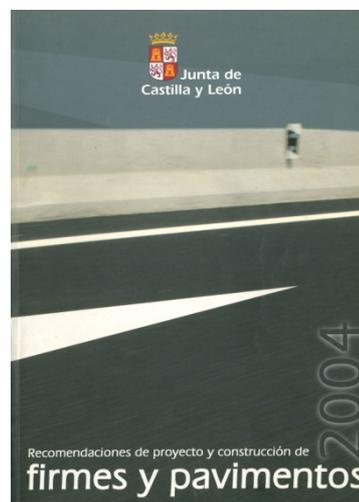
Posteriormente otras Instrucciones o Normas de carácter regional como las Recomendaciones de proyecto y construcción de firmes y pavimentos de la Junta de Castilla y León (1996)<sup>(7)</sup> o la Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía de la Junta de Andalucía (1999)<sup>(20)</sup> modifican las secciones tipo del Ministerio, adaptándolas a las características de los materiales disponibles

en cada Comunidad. Aunque tampoco se incluye el diseño de las secciones con material reciclado, en las Recomendaciones de la Junta de Castilla y León se incluye un anejo dedicado al “reciclado in situ con cemento”, debido al creciente interés despertado por esta técnica.

En dicho anejo se indica que para el reciclado se pueden adoptar por su similitud, las estructuras de firme semirrígido con base de suelocemento apoyadas sobre una explanada de categoría E3 (índice  $CBR \geq 20$ ), sustituyendo dicha base por la capa reciclada.

En el año 1999, el Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), publica el Manual de Firmes Reciclados in situ con Cemento<sup>(8)</sup>, del que ya se había presentado un adelanto en el IV Congreso Nacional de Firmes, dedicado monográficamente al reciclado de firmes, celebrado en Segovia en junio de 1998. En este Manual se recogen todos los aspectos relacionados con el reciclado, tanto en lo referente a los estudios necesarios (estudios previos, definición del reciclado, determinación de la formula de trabajo, etc), como a la realización en sí (equipos, ejecución de las obras, control de calidad, etc). Además se incluye un estudio de costes y una propuesta de Pliego de Prescripciones Técnicas Generales.

Para el dimensionamiento de la rehabilitación de un firme mediante reciclado in situ con cemento, además de exponer las posibilidades de un diseño particularizado mediante el estudio analítico de la estructura del firme reciclado (cálculo directo o inverso), el Manual propone un catálogo de secciones de acuerdo a las siguientes directrices:



- Tráfico: se consideran las categorías de tráfico pesado establecidas por la Dirección General de Carretera del Ministerio de Fomento con las subdivisiones adoptadas por la Junta de Castilla y León en las citadas Recomendaciones y posteriormente en la Instrucción de Firmes del Ministerio (salvo T43 que desaparece):

Tabla 2. Categorías de tráfico (Manual IECA, 1999)

Categoría de tráfico	T0	T1	T2		T3		T4			
Subcategoría	T0	T1	T21	T22	T31	T32	T41	T42	T43	
IMD <sub>p</sub> <sup>(1)</sup>	>	2000	800	400	200	100	50	25	12	0

<sup>(1)</sup> Intensidad Media Diaria de vehículos pesados en el carril de proyecto y año de puesta en servicio.

- Materiales: se consideran dos características mecánicas de materiales reciclados:

Tabla 3. Características del material reciclado (Manual IECA, 1999)

Características	Tipo A	Tipo B
R <sub>c</sub> min 7 días	2,5 MPa	3,5 MPa
E de cálculo 90 días	6.000 MPa	10.000 MPa
Contenido mínimo de cemento	3%	3,5 %
Densidad mínima en obra	97% D <sub>máx</sub>	97% D <sub>máx</sub>

R<sub>c</sub> = resistencia a compresión simple sobre probeta cilíndrica de Ø 0,15 m y L = 0,18 m. Esta prescripción se reduce en un 15% cuando se emplean cementos con alto contenido de adiciones por su mayor evolución de resistencias a largo plazo.

E = módulo de elasticidad (orientativo)

D<sub>máx</sub> = densidad máxima obtenida en el ensayo Proctor modificado (Norma UNE 103501)<sup>(21)</sup>

Las secciones de firme propuestas son:

Tabla 4. Secciones de firme reciclado diseñadas en el Manual IECA, 1999  
RECICLADO TIPO A (mín. 2,5 MPa A 7 días)

SECCIONES DE FIRME REHABILITADO (Espesores mínimos en cm)									
Categoría de tráfico pesado	T0	T1	T21	T22	T31	T32	T41	T42	T43
Mezcla bituminosa	18	15	12	12	12	10	8	5	DTS
Capa reciclada in situ con cemento	35	35	35	30	25	25	22	20	20

RECICLADO TIPO B (mín. 3,5 MPa a 7 días)

SECCIONES DE FIRME REHABILITADO (Espesores mínimos en cm)									
Categoría de tráfico pesado	T0	T1	T21	T22	T31	T32	T41	T42	T43
Mezcla bituminosa	18	15	12	12	12	10	8	5	DTS
Capa reciclada in situ con cemento	30	30	30	25	22	22	20	18	18

DTS=doble tratamiento superficial

Las secciones estructurales diseñadas como reciclado tipo A son las que se están diseñando y construyendo en España.

Actualmente, la única normativa que incluye secciones de firmes rehabilitados mediante la técnica del reciclado in situ con cemento son la Recomendaciones de Proyecto y Construcción de Firmes y Pavimentos<sup>(7)</sup> de la Junta de Castilla y León. Las categorías de Tráfico coinciden con las incluidas en la Norma 6.1-IC<sup>(1)</sup> del Ministerio de Fomento (subdividiendo además la categoría de tráfico T2) y las secciones tipo coinciden con las indicadas como tipo A en el Manual de firmes reciclados in situ con cemento del IECA:

Tabla 5. Características del material reciclado (Junta de Castilla y León, 2004)

R <sub>c</sub> min 7 días	2,5 MPa
E de cálculo 90 días	6.000 MPa
Contenido mínimo de cemento	3 %
Densidad mínima en obra	97% D <sub>máx</sub>

Tabla 6. Secciones de firme reciclado (Recomendaciones, Junta de Castilla y León, 2004)

SECCIONES DE FIRME REHABILITADO (Espesores mínimos en cm)								
Categoría de tráfico pesado	T0	T1	T21	T22	T31	T32	T41	T42
Mezcla bituminosa	18	15	12	12	12	10	8	5
Capa reciclada in situ con cemento	35	35	35	30	25	25	22	20

Además este tipo de material reciclado de 2,5 MPa de resistencia a compresión, es el que ha adoptado la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento en la publicación del correspondiente capítulo nº21 del Pliego General de Prescripciones Técnicas PG-4, Reciclado in situ con cemento de capas de firme<sup>(6)</sup>, O.C. 8/2001 de 28 de Diciembre. En este capítulo se incluyen las prescripciones exigidas al material reciclado, que se resumen a continuación:

Tabla 7. Art. 21 del PG-4. Reciclado in situ con cemento de firmes, 2001

Tamaño máximo	≤ 80 mm
Pase tamiz UNE 4 mm	≥ 30 % (o corrector ZA)
Materia Orgánica	< 1 %
Contenido sulfatos SO <sub>3</sub>	< 1 %
Plasticidad	IP < 15 y LL < 35
Contenido de cemento tipo 32,5	> 3%
Resistencia compresión 7 días	≥ 2,5 MPa
Cementos con alto contenido de adiciones	≥ 2,1 MPa
Densidad in situ	≥ 97% D <sub>máx</sub> Proctor modificado
Plazo de trabajabilidad	
en ancho completo	2 horas
trabajando por bandas	3 horas
con tráfico	4 horas
Si temperatura > 30° obligatorio uso retardador de fraguado	

Por otro lado se exigen unos tiempos máximos de realización que se resumen a continuación:

- tiempo extendido cemento – mezcla < 1 hora
- tiempo mezcla – compactación – terminación < 1/2 hora
- tiempo terminación – curado < 3 horas

## 2.5. EL PROYECTO

Antes de efectuar un reciclado con cemento es preciso realizar una serie de estudios previos con objeto de:

- Verificar la factibilidad del reciclado, definiendo las características de los materiales existentes y el espesor de las capas de firme (determinando si existen sustancias tales como materias orgánicas, sulfuros (piritas), sulfatos (yesos) o cloruros (sal gema) que pueden perturbar o incluso impedir el fraguado del cemento).

Para ello se debe proceder al reconocimiento de la carretera con la recopilación de toda la información posible como proyectos o informes de las actuaciones que se hayan realizado, la inspección del firme existente, evaluando los deterioros del mismo y la realización de una campaña de auscultación (normalmente se reciclan tramos con deflexiones superiores a los  $200 \times 10^{-2}$  mm si la categoría de tráfico es inferior a T1).

- Realizar una división de la carretera en tramos homogéneos en cuanto a tráfico, tipo de firme, estado del mismo, etc, en base a los datos anteriores y a una campaña de extracción de testigos y apertura de calicatas (al menos una por km), que nos definan los espesores de cada capa y nos permita obtener muestras de los materiales.



Foto 2. Calicata de muestreo

- Caracterizar los materiales del firme en el laboratorio determinando:

- o La naturaleza y humedad de la explanada.
- o La naturaleza y humedad de los materiales del conjunto del firme (granulometría, plasticidad, humedad y densidad Proctor modificado, identificación de productos inhibidores de fraguado, ...).

A partir de los resultados del estudio de factibilidad, se determinan los distintos parámetros del proceso de reciclado. En concreto, hay que precisar el espesor de firme existente que puede ser tratado y en función del dimensionamiento realizado, si es necesario aportar material para lograr el espesor necesario, así como la fórmula de trabajo. Dicha fórmula debe indicar:

1. La granulometría y tolerancia en el huso de los productos resultantes del escarificado y, en su caso, la necesidad de una corrección mediante el aporte de un corrector granulométrico (árido fino). De acuerdo con el pliego el tamaño máximo deberá ser inferior a 80 mm, siendo más apropiado tamaños menores, y el pase por el tamiz de 4 mm (árido fino) superior al 30%.

2. el contenido de agua del material en el momento del mezclado.
3. la densidad a obtener, cuyo valor medio no debe ser inferior al 97% de la densidad máxima obtenida en el ensayo Proctor modificado.
4. el tipo y contenido de cemento a utilizar (superior al 3% según el Pliego), así como de los eventuales aditivos (por ejemplo, retardadores de fraguado). Es recomendable el empleo de cementos con alto contenido en adiciones (CEM V, CEM IV, CEM III, CEM II-B y ESP VI-1) y clase resistente media o baja (32,5 o 22,5) a fin de disponer de un mayor plazo de trabajabilidad y limitar los efectos de la fisuración por retracción. Los cementos de clase resistente superior, como los 42,5, deben reservarse para tiempo frío.

Para determinar la dosificación óptima de cemento se realizan dos o tres series de probetas. Esta dosificación óptima debe ser la mínima compatible con las resistencias exigidas, no sólo por economía, sino para conseguir una fisuración fina salvo en firmes apoyados en suelos muy plásticos o de mala calidad que no aseguren una explanada E3. En este caso, aunque el porcentaje mínimo a dosificar sea del 3% y se logre la resistencia mínima exigida de 2,5 MPa a los 7 días (2,1 MPa con cemento con alto contenido de adiciones) se debe considerar lo siguiente:

Cuando se diseñaron las secciones de firme reciclado se consideró que la explanada sobre la que se apoya el firme puede aceptarse como categoría E3, debido a la elevada compactación sufrida a lo largo de los años. Pero esto no es siempre cierto, sobre todo cuando el firme se apoya sobre suelos muy plásticos. Además la normativa de firmes actual obliga a estabilizar la explanada con cemento para obtener una explanada E3, situación que no es posible en un reciclado. Por ello en esta situación peculiar de suelos de mala calidad situados bajo el firme se debe incrementar el espesor de la capa reciclada sin tocar dichos suelos, para lo que en muchos casos habrá que aportar material si no hay espesor suficiente, y/o habrá que incrementar el porcentaje de cemento debiéndose ir a resistencias superiores de 3 a 3,5 MPa.



Figura 3. Ensayo Proctor modificado

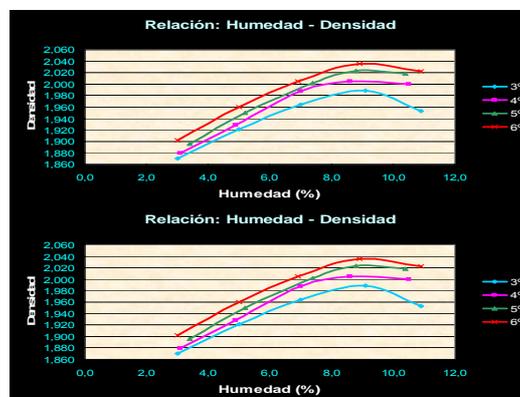


Figura 4. Resultados de resistencias

Para obtener la dosificación las probetas se fabrican con los materiales que se espera obtener del fresado del firme, con la incorporación de un corrector granulométrico si se ha estimado necesario, y distintas dotaciones de cemento. Dichas probetas, compactadas a la densidad mínima exigida en obra y con la humedad óptima según el ensayo Proctor modificado, se rompen a compresión simple a la edad de 7 días. Una vez hecha una primera selección del contenido de cemento conviene realizar un análisis de sensibilidad sobre probetas compactadas a densidades que difieran en -2 puntos de la antes usada. De esta forma se puede determinar el contenido mínimo de cemento a añadir al material que garantice suficientemente la obtención de la resistencia a compresión exigida con las densidades obtenidas en obra.

En las obras de reciclado la elección del tipo de cemento tiene una importancia menor en comparación con el porcentaje de dosificación de conglomerante o el grado de compactación alcanzado.

5. El plazo de trabajabilidad del material reciclado, entendiéndose por tal el tiempo transcurrido desde el final de la mezcla del mismo con el cemento y el agua durante el cual, por no haber comenzado todavía el fraguado del conglomerante o bien estarse iniciando, es posible compactar el material sin que se produzca ningún deterioro apreciable de sus propiedades mecánicas.

A medida que se va desarrollando el proceso de hidratación del cemento, empiezan a formarse enlaces entre los áridos o las partículas procedentes de la escarificación del firme. Dichos enlaces pueden ser destruidos, sin posibilidad de regenerarse, por los esfuerzos provocados por los rodillos. Por otra parte, a medida que se va rigidizando el material, más difícil resulta su compactación. En consecuencia, ésta debe completarse antes de que se haya formado un número demasiado elevado de enlaces cuya rotura podría perjudicar de forma importante el comportamiento posterior del material. El intervalo máximo dentro del cual pueden efectuarse las operaciones de compactación es lo que se denomina plazo de trabajabilidad, y su determinación se encuentra definida en la norma UNE 41240<sup>(22)</sup>.

No hay que confundir el plazo de trabajabilidad con el tiempo de fraguado del conglomerante, que lógicamente es uno de los parámetros que lo influyen, aunque no el único. La naturaleza de los materiales escarificados, el contenido de agua o las condiciones climáticas de la obra son otros factores a tener en cuenta: por ejemplo, a igualdad del resto de condiciones, un aumento de la temperatura ambiente de 20°C a 30°C puede reducir a la mitad dicho plazo.



Foto 3. Realización de probetas

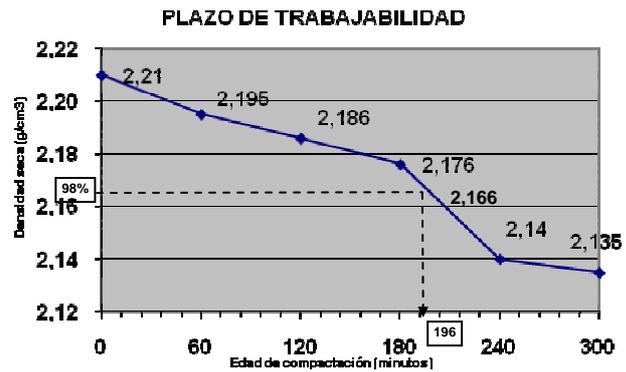


Figura 5. Definición de la trabajabilidad

## 2.6. EQUIPOS

Los equipos a utilizar en un reciclado son los distribuidores de conglomerante y los equipos de reciclado, además de otros equipos auxiliares como motoniveladora o rodillos compactadores. Entre los primeros se pueden diferenciar los siguientes<sup>(23 y 24)</sup>:

### 2.6.1. Distribuidores de conglomerante

Los equipos distribuidores de conglomerante pueden ser dosificadores en polvo o en forma de lechada. La distribución manual no debe admitirse.

En general, en el caso de un reciclado es prácticamente imprescindible utilizar los distribuidores en forma de lechada ya que evitan pérdidas de conglomerante por el viento, es una solución más respetuosa con el medio ambiente y proporciona una dosificación más precisa y mejor distribuida.

#### 2.6.1.1. Dosificadores en forma de polvo

Los dosificadores en polvo suelen ser camiones-silo o tanques remolcados con tolvas acopladas en la parte posterior con compuerta regulable y tornillo distribuidor ligado, o no, a la velocidad de avance del vehículo tractor. Como regla general deben protegerse con faldones para limitar la emisión de polvo.

Los dispositivos de dosificación pueden ser de tipo ponderal o volumétrico, siendo los ponderales los únicos aceptables.



Foto 4. Dosificador en polvo Panier



Foto 5. Distribuidor de lechada Wirtgen

### 2.6.1.2. Dosificadores en forma de lechada

Estos equipos están constituidos fundamentalmente por un silo de cemento, un depósito de agua, un mezclador de suspensión, una bomba que impulsa la suspensión hasta el rotor de fresado y equipos electrónicos capaces de dosificar ponderalmente el porcentaje indicado de lechada respecto al peso del material tratado. La dosificación exacta se obtiene en función de la velocidad de avance del equipo, la densidad del suelo, el contenido de cemento necesario y la profundidad requerida de trabajo.



Fotos 6 y 7. Detalles del distribuidor de lechada Wirtgen WM-100

Si la humedad del suelo está próxima a la de compactación, la aportación de la lechada no es admisible, requiriéndose entonces rebajar la humedad inicial del suelo previo oreo del material.

### 2.6.2. Equipos de reciclado

Estos equipos llevan, en su parte central, un rotor alojado dentro de una carcasa protectora, donde se realiza el mezclado del suelo con el agua y el cemento, saliendo el producto resultante por una compuerta regulable situada en su parte trasera. El rotor de fresado puede llevar picas o paletas, montadas siguiendo una disposición helicoidal. La

carcasa dispone de una barra regadora con una serie de toberas para la inyección del agua o de la lechada de cemento.



Foto 8. Recicladota Wirtgen WR-2500

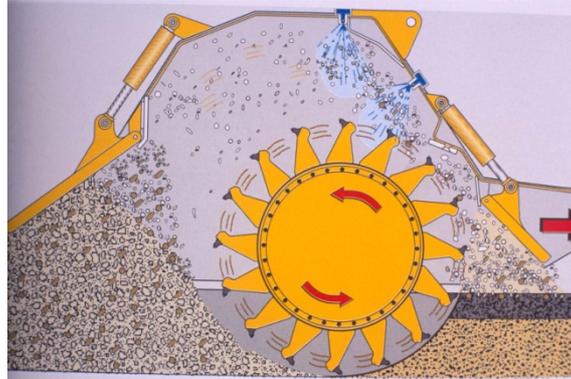


Figura 6.- Esquema de rotor

Es necesario reponer una proporción importante de picas a lo largo de la jornada de trabajo ya que son elementos sometidos a un gran desgaste.

Algunos equipos disponen, en su parte trasera, de un tornillo sinfín ajustable en altura, que distribuye el material por delante de una regla vibrante extensible que lo precompacta. Otros equipos constan de una cámara de mezclado móvil, con anchos de trabajo de hasta 5,75 m, que necesitan trabajar junto a una motoniveladora o una extendedora. Los anchos de trabajo oscilan entre 2 m y 3,8 m siendo lo normal 2,40 m y las profundidades de trabajo pueden llegar en algunos casos hasta los 40 cm.



Foto 9. Recicladora Beugnet con cámara de mezclado



Foto 10. Recicladora Wirtgen con dosificador de conglomerante incorporado

### **2.6.3. Equipos recicladores con dosificador de conglomerante incluido**

Aunque por su menor capacidad de almacenamiento de conglomerante no se utilizan, se comercializan equipos de reciclado idénticos a los ya citados, que además incorporan un silo para el conglomerante que dosifica en forma de lechada en el rotor de reciclado<sup>(25)</sup>.

## 2.7. EL PROCESO CONSTRUCTIVO

Dada la similitud de ejecución del reciclado de firmes in situ con cemento con otras unidades de obra como la estabilización de explanadas o la construcción del suelocemento in situ, la ejecución es similar, siendo válido todo lo concerniente a materiales tratados con cemento (plazo de trabajabilidad, necesidad de obtener la compactación, etc), por lo que se omite aquí una descripción referenciando al lector al Manual de materiales tratados con cemento<sup>(18)</sup> publicado por CEDEX-IECA. No obstante conviene puntualizar algunos aspectos por su importancia<sup>(26)</sup>:

- Hay que planificar correctamente la obra en todas sus fases, por lo que previamente a la unidad de obra del reciclado, se deben resolver los problemas de explanada y drenaje que exista. El reciclado del firme con cemento permite la recuperación estructural de esta capa, pero si el agotamiento se debe a problemas de drenaje (acumulación de agua en las márgenes de la carretera y penetración en las capas inferiores formadas por suelos sensibles), la carretera volverá a presentar deterioros con el tiempo. Por eso previamente a la realización del reciclado, se deben resolver los problemas de explanada, blandones y drenaje existentes y realizar las cunetas adecuadas.
- Antes de iniciar un reciclado se deben comprobar también los resultados obtenidos en los ensayos previos. Se debe reciclar un pequeño tramo de varios metros con los equipos sin dosificar cemento para tomar algunas muestras y realizar un ensayo Proctor modificado, obteniendo la humedad óptima y densidad máxima del material reciclado, así como la granulometría real obtenida tras el paso de los equipos. Además se debe realizar un estudio de dosificación para corroborar el porcentaje de cemento. La realización de este tramo de ensayo debe hacerse con suficiente tiempo de antelación para tener los resultados disponibles antes de iniciar esta unidad de obra (7 días como mínimo).

La ejecución de un tramo de prueba, que puede quedar integrado como parte de la obra, es imprescindible al permitir comprobar la idoneidad de la fórmula de trabajo y de los medios mecánicos propuesto, la relación entre el número de pasadas del equipo de compactación y la densidad obtenida, y la conformidad del material reciclado con las condiciones especificadas en laboratorio.

- Durante la realización del reciclado hay que cuidar además los siguientes aspectos:
  - Dosificación del cemento: en un reciclado el cemento se debe dosificar siempre en forma de lechada sobre el tambor del equipo reciclador.

Además se debe asegurar el suministro continuo de cemento durante la obra para evitar tener los equipos parados.



Foto 11. Suministro de cemento



Foto 12. Equipos en la Ruta de la Plata

- Anchura de reciclado: la maquinaria normalmente utilizada (Wirtgen WR 2500) tiene una anchura de reciclado de 2,44 m por lo que la sección se tiene que dividir en bandas considerando el solape necesario (2,40 m efectivos, que son 2,00 m en el caso de la Wirtgen WR 2100). Una carretera de anchura inferior a 4,80 m se podrá reciclar en dos bandas, pero cualquier otra sección de mayor anchura deberá reciclarse en tres bandas, poniendo especial atención en no sobredosificar las bandas de solape.

Se deberá cuidar muy especialmente no formar juntas frías en estas bandas que posteriormente provocarán una fisuración longitudinal de la carretera, por lo que todas las operaciones de solape deberán realizarse con cuidado y dentro del plazo de trabajabilidad del material.

Por otro lado el ancho de la sección final reciclado no puede ser mayor que la del firme disponible. No se deben reciclar los arcenes cuando en ellos haya vegetación, materia orgánica, suelos plásticos o cualquier otra materia perjudicial para el fraguado del cemento. Si se desea una plataforma mayor, habrá que considerar la obra como un ensanche, abriendo una caja y aportando una zahorra de características similares al firme existente para reciclar con el mismo, o bien disponiendo un suelocemento de central en la caja.

Por eso, antes de iniciar el reciclado los bordes del firme deben ser limpiados detalladamente, sin que queden restos de suelos plásticos o materia vegetal y dejando bien marcado los límites de la anchura del reciclado.

- Longitud de las bandas de reciclado: en condiciones normales, no conviene que pasen más de 2 horas (o el plazo de trabajabilidad si se ha determinado) desde que se inició el reciclado de la primera banda hasta que se termina la compactación de la última banda de esta misma sección, por lo que inicialmente la longitud de las bandas de reciclado no deben ser mayor de unos cien metros, pudiéndose ampliar esta distancia si la ejecución se comprueba que se hace correctamente y la temperatura ambiente es aceptable.

La longitud deberá además optimizarse para que cuando se consuma el cemento del equipo dosificador de lechada y haya que volverlo a cargar, coincida con el final de una sección completa de carretera.

- Control del espesor reciclado: se debe controlar el espesor reciclado mediante la apertura de catas realizadas en el material antes de compactar junto a la banda de carretera sin reciclar, que se tomará como referencia para medir la profundidad. En la última banda reciclada, al medir el espesor se tendrá en cuenta la reducción del material al compactarlo.



Fotos 13 y 14. Control del espesor, características y densidad del material

- Homogeneidad del material reciclado: en la apertura de las catas para controlar el espesor se comprobará que el material es homogéneo en color (mezcla con cemento) y humedad. Se debe controlar que la velocidad de la máquina de reciclado no sea superior a 10 m/min para que el material esté suficiente tiempo en la cámara de mezclado del tambor.
- Humedad: para conseguir una buena compactación del material y la resistencia prescrita se deberá controlar que la humedad del material está próxima a la óptima del ensayo Proctor modificado. Este es el parámetro más difícil de asegurar en obra. Un inadecuado control diario de la humedad del terreno previo a la ejecución del reciclado que conlleve un exceso de humedad provoca unos descensos de la densidad y por tanto de la resistencia a compresión de las probetas que puede dar lugar a fallos puntuales del firme.

Es importante disponer de un equipo de obra capaz de difuminar agua que ayude a lograr la compactación superficial y evite desecaciones.

- Nivelación: tras el material reciclado se realiza uno o dos ciclos de compactación (ida y vuelta) con el rodillo vibrando en su amplitud máxima, solapando las bandas hasta trabajar en todo el ancho de la sección. Posteriormente la motoniveladora actúa refinando para obtener la rasante.

La motoniveladora debe remover el material lo menos posible por su tendencia a crear segregaciones y nidos de gruesos, intentando siempre realizar un refino, es decir retirada de material en los puntos altos, y no aportación de capas delgadas (evitar la agrupación de gruesos sin envolver en superficie). No se puede pretender arreglar con la motoniveladora

los problemas de regularidad superficial. Si se retira material reciclado de una zona para aportarlo a otra, además de tener serios problemas de segregación, se reducirá el espesor de capa reciclada en la zona donde se extrajo. Se debe por tanto aportar material antes de realizar el reciclado donde se desee modificar la rasante, como puede ocurrir en las curvas que carezcan de peralte<sup>(27)</sup>.



Fotos 15 y 16. Compactación del material reciclado

- Compactación: al inicio de las obras y alguna otra vez durante las mismas se deberá definir el sistema de trabajo de los rodillos compactadores. Para ello tras el primer ciclo de compactación y la motoniveladora, se darán varios ciclos completos (ida y vuelta), terminando con una pasada sin vibrar. Con la sonda nuclear debidamente contrastada se irá midiendo la densidad en varios puntos tras cada ciclo de compactación, finalizándose cuando se aprecie que las densidades disminuyen. Es importante mentalizar al maquinista de la importancia de su trabajo, por lo monótono y aburrido que resulta, y controlar de vez en cuando que se realiza correctamente.
- Control de la compactación: es muy importante que se controlen las densidades en obra mediante sistemas rápidos como la sonda nuclear, que permitan correcciones en el plan de compactación si no se obtiene como mínimo el 97% de la densidad máxima Proctor modificado. Los primeros días este control debe ser intenso, debiendo estar el equipo de control continuamente en obra.

Si las densidades mínimas no se obtienen, habrá que comprobar aspectos como el correcto estado del equipo de compactación, el valor de la densidad y humedad óptima del Proctor de referencia, los equipos con los que se hicieron este Proctor, etc.
- Prefisuración: se considera imprescindible prefisurar el pavimento con cualquiera de las técnicas disponibles cuando el tráfico pesado sea igual o superior a la categoría T2 y/o las condiciones climáticas lo aconsejen. En cualquier caso, siempre resulta adecuado<sup>(28)</sup>.
- Control de resistencias: diariamente se deben realizar 2 series de 3 probetas para romper a compresión a la edad de 7 días. A título informativo se puede romper alguna a 90 días.



Fotos 17 y 18. Equipos de control a pie de obra

- Curado: si el curado con emulsión de la capa reciclada se realiza a mediodía y al final de la jornada en lugar de a medida que se avanza, se debe humedecer la superficie de vez en cuando pulverizando agua (no encharcando) para evitar desecaciones. Es muy importante disponer en obra de cualquier equipo capaz de pulverizar agua (puede ser un equipo agrícola adaptado a la cuba de agua, pero no el abanico de esta), que además permita añadir agua durante la compactación si se observan desecaciones superficiales (sobre todo cuando hace calor o hay viento).

En las zonas en la que haya cruce de caminos o en los tramos en los que vaya a circular el tráfico, la emulsión deberá protegerse con gravilla 3-6 (dotación entre 4 y 6 l/m<sup>2</sup>), que se deberá compactar y barrer, tras el extendido.

- Tráfico: hay que intentar si es posible cortar la carretera al tráfico para lo que habrá que señalar los itinerarios alternativos e informar adecuadamente y con antelación al usuario.

En caso de tener que trabajar con tráfico habrá que señalar bien las obras, disponer de personal que dirija el paso alternativo, organizar bien la forma de trabajo y proteger el material reciclado después de curarlo con una emulsión y un árido 3-6, que se deberá compactar y barrer. Al final del tajo se deberá pintar el eje con pintura amarilla.

Además, habrá que prever donde aparcar todos los equipos al final del día, transportándolos cuando todavía haya suficiente luz.

- Limpieza: finalizado el reciclado y antes de extender la capa de rodadura, se debe realizar un enérgico barrido, retirando todos los áridos sueltos que hayan quedado en superficie y la emulsión de curado que no esté perfectamente adherida. La barredora es un equipo imprescindible en obra, que debe ser muy utilizada en una obra de reciclado, sobre todo si se realiza con tráfico circulando.
- Se debe asegurar la correcta adherencia de la capa superior y la de reciclado, por lo que se tendrá especial cuidado en realizar adecuadamente el riego de adherencia y evitar que se levante con los vehículos de obra<sup>(29)</sup>.

## 2.8. LA EXPERIENCIA EN ESPAÑA

Las primeras aplicaciones de reciclado de firme in situ con cemento tienen lugar entre diciembre de 1991 y marzo de 1992 en la carretera N-431, entre Huelva y Cartaya<sup>(31)</sup>. Se trata de un reciclado de 13 km, diseñado por el Ministerio de Fomento para rehabilitar esta carretera, que tiene un elevado porcentaje de deterioros en toda su superficie. El firme consistía en un espesor variable entre 10 a 15 cm de mezclas bituminosas, sobre 15-18 cm de zahorra artificial y 15 cm de zahorra natural, (relaciones material granular / bituminoso de 3/1 a 2/1) apoyados sobre un suelo tolerable (CBR entre 3 y 5) con índice de plasticidad entre 10 y 25. En diversos tramos, bajo la zahorra artificial volvía a haber incluso 7-15 cm de mezcla bituminosa sobre macadam. El espesor reciclado es de 30 cm, con un 4,5% de cemento, sobre el que se disponen 5 cm de mezcla bituminosa en caliente.

A pesar del intenso tráfico pesado que soportaba esta carretera (12.000 vehículos/día con un 10% de pesados, actualmente 9.760 vehículos/día con un 5,1% de pesados al construirse la A-49) y del reducido espesor de mezcla bituminosa dispuesto, el comportamiento estructuralmente es aceptable.



Foto 19. Reciclado N-431, Huelva–Cartaya. 1991



Foto 20. N-630. Ruta de la Plata. Cáceres. 1995

La segunda realización tiene lugar en Valladolid, en 16 km de la carretera comarcal C-519, entre las localidades de Villabrágima y Villagarcía de Campos, en el año 1994<sup>(30)</sup>. Se trata de una carretera ensanchada en el año 1988 con 20 cm de zahorra natural y reforzada en su conjunto con 25 cm de zahorra artificial y 8 cm de mezcla bituminosa en caliente (relación 3/1). El escaso firme empleado para el tráfico que soportaba la carretera (la Norma 6.1 y 6.2-IC del Ministerio de Fomento publicada el año después exige 18 cm de mezcla bituminosa), junto con el empleo de una zahorra caliza margosa con algo de plasticidad, conllevan a un prematuro agotamiento del firme que obligaba a continuas campañas de bacheo.

La Junta de Castilla y León, organismo gestor de esta carretera, se plantea entonces la rehabilitación total del conjunto, diseñando un reciclado con cemento del firme en una profundidad de 33 cm (según cálculos realizados con un programa analítico), sobre el que se disponen 4 cm de mezcla bituminosa.

En el año 1995 se procede al reciclado de varios tramos de la carretera N-630, más conocida como la Ruta de la Plata, con una longitud total de casi 36 km, entre la localidad de Cañaverall en la provincia de Cáceres y el límite de dicha provincia con la de Salamanca. El reciclado se lleva a cabo ante los elevados deterioros superficiales, con zonas de calzada muy agrietadas y fisuradas, y zonas de ensanche prácticamente rotas debido al elevado tráfico pesado (de 4.000 a 7.000 vehículos con un 18 a 29% de pesados, categoría T1) que los refuerzos realizados en su día con mezcla bituminosa en frío no pueden resolver. Así, se reciclan 25 cm de espesor en los tramos con explanada E2 (índice CBR entre 10 y 20), y 30 cm de espesor sobre explanada E1 (de CBR entre 5 y 10), sobre los que se disponen 10 cm de mezcla bituminosa en caliente.

A finales de este mismo año 95, se reciclan también en una longitud de 59 km, los arcenes de zahorra natural de la carretera N-430, entre Acedera y Presa de García Sola, arcenes que se encontraban sin pavimentar con un desnivel respecto a la calzada. Tras un reciclado de 20-22 cm, se disponen encima 12 cm de mezclas bituminosas en caliente (7+5 cm).

Si bien estas primeras actuaciones de gran importancia son realizadas por el Ministerio de Fomento, a partir de esta fecha, es la Dirección General de Carreteras de la Junta de Castilla y León quién toma el relevo, y tras la primera realización de 16 km del año 94, en el año 1997 lleva a cabo otras dos actuaciones: el reciclado de 1,5 km de la variante de Segovia, acceso Zamarramala y al vertedero de la ciudad, en una profundidad de 25 cm (40 cm en alguna zona de blandones) para lograr una explanada de calidad sobre la que apoyar un firme experimental de 23 cm hormigón poroso con una base de 25 cm de suelocemento; y el reciclado en Ávila de la carretera AV-902, entre las localidades de Burgohondo y Navalunga con una longitud de 4,5 km y un trazado sinuoso propio de la zona montañosa en la que se ubica.



Foto 21. Reciclado de arcenes en N-430. Badajoz. 1998



Foto 22. Reciclado Ubrique-Jimena en Cádiz. 1998

Posteriormente en el año 98, coincidiendo con la realización del IV Congreso Nacional de Firmes, dedicado monográficamente al tema que nos ocupa, se llevan a cabo otras dos actuaciones en Segovia: el reciclado de las carreteras SG-241 y SG-242 en unos 14,5 km, entre las poblaciones de Sepúlveda y Sacramenia; y el de la carretera SG-211, desde

el cruce con la C-601 hasta Aguilafuente, de unos 18 km que en su mayor parte (salvo travesías) se había reciclado el año anterior. En ambos casos se reciclan 25 cm de profundidad, aportándose en el primero 10 cm de zahorra artificial, para obtener espesor suficiente de reciclado, sobre el macadam con tratamiento superficial existente, y un 10% de arena machacada caliza como corrector granulométrico en el segundo de ellos.

Además en este año 1998, se reciclan 14 km en Zamora, en la carretera ZA-511 entre Villalpando y Villanueva del Campo, en una profundidad de 20 cm, y 17,7 km en Ávila, en la carretera AV-114, entre las localidades de San Pedro del Arroyo y Muñico. En esta última obra, tipo de las muchas que actualmente se reciclan en España (reducido tráfico de 300 vehículos/día y firme deteriorado, con pérdida de la capacidad estructural, formado por macadam y varios riegos asfálticos) se reciclaron 30 cm de profundidad con dos equipos Wirtgen diferentes (WR 2500 y 2100 DCR), alimentados por sendos distribuidores de lechada WM-1000 y WM-400, extendiéndose posteriormente encima una única capa de 5 cm de mezcla bituminosa en frío fabricada con betún modificado. A finales de año se inicia otro tramo en Segovia, en la carretera SG-313, entre las localidades de Garcillán y Abades, en el que se recicla la carretera existente en una profundidad de 20 cm y se aporta material para realizar un suelocemento in situ.

A la vez, en marzo de ese mismo año se comienza la primera obra en la Comunidad Autónoma de Andalucía, reciclándose 59,6 km de firme (macadam y doble tratamiento superficial) de la carretera C-3331, desde Ubrique hasta Jimena de la Frontera. Esta obra de la Junta de Andalucía supone el reciclado de una superficie de 314.000 m<sup>2</sup>, y es el inicio de un gran número de realizaciones llevadas a cabo en esta Comunidad. A finales de año, la Diputación de Sevilla lleva a cabo un reciclado de 22 cm de profundidad entre Aznalcollar y El Alamo (unos 114.000 m<sup>2</sup>). Además, se realiza el reciclado de 18.000 m<sup>2</sup> (Jerez) y 19.000 m<sup>2</sup> (Olvera) en la provincia de Cádiz.

En Extremadura, la Diputación de Badajoz realiza también el reciclado de 11,5 km de la carretera de Aceuchal a Villafranca de los Barros. Se reciclan en unos 75.300 m<sup>2</sup>, con una profundidad de 18 cm, el doble tratamiento superficial y las mezclas bituminosas en frío existentes sobre macadam de la calzada antigua. Como pavimento se disponen 3 cm de mezcla bituminosa de alto módulo sobre el reciclado.

En Madrid se recicla la carretera de Algete (50.000 m<sup>2</sup>) y en Valencia se inicia una tímida experiencia en la Variante de Alcira Norte (10.000 m<sup>2</sup>). En total, en este año 1998 se recicla una superficie de casi un millón de metros cuadrados, lo que supone un importante incremento de la actividad.



Foto 23. Extensión de corrector granulométrico.  
Segovia. 1998



Foto 24. Vista exterior del reciclado de  
Zamarramala. Segovia. 1997

Paralelamente a estas actuaciones se celebran una serie de Jornadas y Congresos, que rápidamente se convierten en foros de discusión sobre todos los aspectos relacionados con la técnica, tales como el diseño, el control de los materiales, los problemas de ejecución, detalles, maquinaria, etc. Entre ellos cabe mencionar los siguientes:

- 1992, Jornada sobre reciclado y estabilización in situ con cemento. Huelva. TRACSA-IECA.
- 1994, II Congreso Nacional de Firmes: Regeneración y rehabilitación. Valladolid. Junta de Castilla y León, Asociación Española de la Carretera.
- 1995, Jornada sobre reciclado con cemento de firmes. Cáceres. IECA.
- 1996, III Congreso Nacional de Firmes: Tecnología en frío. Burgos. Junta de Castilla y León, Asociación Española de la Carretera.
- 1996, Curso sobre reciclado de firmes y pavimentos. Madrid. INTEVIA.
- 1997, VI Jornadas de Conservación de Carreteras. Murcia. Asociación Técnica de Carreteras.
- 1998, I Congreso Andaluz de Carreteras. Granada. Junta de Andalucía.
- 1998, IV Congreso Nacional de Firmes: Reciclado de Firmes. Segovia. Junta de Castilla y León, Asociación Española de la Carretera.
- 2001, 1<sup>er</sup> Simposio Internacional sobre Estabilización de Explanadas y Reciclado in situ de Firmes con Cemento, Salamanca. Junta de Castilla y León, Asociación Española de la Carretera y Asociación Técnica de la Carretera. Habiéndose realizado el 2<sup>o</sup> Simposio en 2005 en París.

En 1999 se llevan a cabo otro gran número de realizaciones por las citadas Comunidades Autónomas de Andalucía, Castilla y León y Extremadura, a las que se suman

las de Aragón y Madrid, resultando un total de 25 tramos reciclados, que representan una superficie total de casi 1.220.000 m<sup>2</sup>.



Foto 25. Compactación del material reciclado SG-310. Segovia. 1997



Foto 26. Refino con motoniveladora. Barcelona. 2001

Aunque en algunas regiones de España el reciclado no genera de momento la confianza suficiente, y solo se ha realizado algún tramo, en la mayoría de las comunidades autónomas esta solución de rehabilitación se afianza claramente realizándose en el año 2000 otras 20 actuaciones, con una superficie reciclada total de aproximadamente 1.547.700 m<sup>2</sup>, cifra que se mantiene en los años posteriores hasta 2006 que se incrementa considerablemente hasta los 2.642.000 m<sup>2</sup>. Los últimos años se recicla una superficie de este mismo orden de magnitud, llegando en el año 2009, según se dijo en la introducción, a una superficie total de carreteras recicladas in situ con cemento en toda España de casi 21 millones de metros cuadrados.

Sin duda, el reciclado in situ con cemento es hoy en día, en una gran parte de España, la mejor alternativa de rehabilitación de un firme por sus claras ventajas técnicas frente al clásico refuerzo con capas de mezcla bituminosa, al lograr recuperar las capas agotadas del firme obteniendo una base homogénea y resistente, a las que se suman sin duda consideraciones económicas y ambientales muy positivas.

## **2.9. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS TRAMOS RECICLADOS**

### **2.9.1. El tráfico**

El tráfico que circula por las carreteras recicladas varía desde las categorías más pesadas, como es el caso de los tramos de la carretera N-630, L.P. Salamanca – Cañaverall Sur con un tráfico de categoría T1 (la IMD en el año 2004 es de 5.649, con 1.663 (29,4%) vehículos pesados), o la carretera N-431, Huelva – Cartaya, con una IMD de 12.000 vehículos y un 10% de pesados (según los datos de tráfico del año de realización, actualmente unos 9.760 vehículos/día pero solo 498 vehículos pesados al construirse la A-49); hasta las

categorías más ligeras, como muchos de los tramos realizados en la provincia de Palencia, con tráficos de categoría T42 (menos de 25 vehículos pesados de IMD por carril).

### 2.9.2. Anchura de reciclado

Las anchuras de reciclado son también muy variables, dependiendo lógicamente de la categoría de la carretera. Mientras que en las vías nacionales gestionadas por el Ministerio de Fomento se llega a reciclar secciones transversales de 10 m (7 m de calzada más arcenes de 1,5 m), en las vías de baja intensidad de tráfico dependientes de las Diputaciones Provinciales o las Comunidades Autónomas, en muchos casos a penas se alcanzan los 5 m, lo que permite realizar el reciclado con solo dos bandas de trabajo.



Fotos 27 y 28. Realización del reciclado con tráfico

### 2.9.3. Secciones de firme existentes

Igualmente las secciones de firme recicladas son muy distintas, existiendo lógicamente en las carreteras principales paquetes de firme mucho más gruesos que en las secundarias. Así las secciones de firme son tan variables, tanto en espesor como en las características de los materiales, como se describen en los siguientes ejemplos:

Tabla 8. Secciones de firmes existentes en calzadas recicladas en España

N-431. Huelva-Cartaya	N-630 L.P. Salamanca- Cañaverall Sur	AV-902 Navaluenga- Burgohondo	SG-241/SG-242. Sepúlveda-Sacramenia
10-15 cm MBC	2,5-9 cm MBF	5 cm MBF	TS
18 cm ZA	11-20 cm MBC	30 cm Macadam	15 cm Macadam
15 cm ZN	20-25 cm ZA o Macadam		

MBC = Mezcla bituminosa en caliente

ZA = Zahorra artificial

TS = Tratamientos superficiales

MBF = Mezcla bituminosa en frío

ZN = Zahorra natural

De manera general, y sobre todo en las carreteras de reducido tráfico, los materiales reciclados suelen ser mezclas bituminosas o tratamientos superficiales junto con las capas de

macadam de base, apareciendo en algún caso zahorras artificiales. Así la relación material granular / bituminoso considerando la profundidad de tratamiento puede variar desde 100/0 a 60/40, siendo muy común en bastantes casos la relación 3/1 o 2/1, es decir 67/33.

#### **2.9.4. Secciones de reciclado nuevas**

Los firmes nuevos diseñados inicialmente son muy heterogéneos ante la ausencia de un catálogo y normativa, obteniéndose mediante métodos analíticos por comparativa con otras opciones de rehabilitación. Mientras que los espesores de reciclado suelen ser de 25 y 30 cm, reduciéndose a 18-20 cm para las calzadas con baja intensidad de tráfico pesado, los espesores de mezcla bituminosa son mucho más variables, disponiéndose en las primeras realizaciones espesores reducidos (una única capa de 5 y 6 cm en las dos primeras realizaciones, que se incrementa a solo 10 cm en la N-630 a pesar del tráfico pesado tan elevado).

Actualmente se tiende a homogenizar las secciones de acuerdo con las incluidas en el Manual de Firmes Reciclados in situ con Cemento<sup>(8)</sup> del Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) y las Recomendaciones de Proyecto y Construcción de Firmes y Pavimentos<sup>(7)</sup> de la Junta de Castilla y León.

Para la realización del reciclado, en algunas obras se aporta una zahorra natural o arena (actualmente zahorra artificial como indica el Pliego del Ministerio de Fomento) como corrector granulométrico cuando el macadam de base se encuentra sin recebar y tiene una granulometría muy discontinua, o bien para mejorar la rasante, obtener el peralte de las curvas o lograr el espesor de firme suficiente para reciclar.



Foto 29. Reciclado de carretera ensanchada en León



Foto 30. Perspectiva de la banda reciclada, con arena aportada y carretera antigua

#### **2.9.5. Equipos**

En cuanto a la maquinaria utilizada, si bien en la primera realización se empleó un equipo ARC-700 del grupo francés BEUGNET, y en alguna otra obra posterior se ha utilizado

una recicladora Caterpillar RM-350 o una Wirtgen 2000 DC con un mezclador Raco-250 detrás, actualmente se ha generalizado el empleo de las recicladoras Wirtgen 2100 DCR y sobre todo las WR 2500, de cuyo modelo se disponen más de 40 equipos en nuestro país<sup>(32)</sup>.

La distribución del conglomerante ha sufrido una evolución similar. Si bien, inicialmente se utilizaron diversos dosificadores con alveolar regulado en función del avance, (el equipo más utilizado para la dosificación en polvo es el Panien), el empleo de las recicladoras Wirtgen ha permitido el uso mayoritario de distribuidores de lechada de esta misma marca, introduciéndose en el año 97 los equipos WM 400 y posteriormente los WM 1000 que es el normalmente empleado, con el fin de lograr mayores rendimientos.

El equipo de compactación empleado suele estar formado por un único rodillo mixto de unas 18 t de peso total y una carga estática por centímetro de generatriz de aproximadamente 53 kp/cm, aunque en algunas obras se utilizan dos equipos, un rodillo tandem vibratorio (de unas 16-19 t) y un rodillo de neumáticos de unas 35 t (5 t por rueda). Últimamente la tendencia es a utilizar un rodillo pesado de 20-25 t de peso que da una o dos pasadas detrás del equipo de reciclado, realizándose posteriormente un refinado con motoniveladora, para lograr una regularidad superficial aceptable. Posteriormente se termina el proceso de compactación con 3-4 pasadas dobles de otro rodillo menos pesado.



Foto 31. Prefisuración en la ruta de la plata. 1995



Foto 32. Terminación con compactador de neumáticos. Cáceres. 1995

Salvo en una de las obras (C-519 en Valladolid y algún corto tramo de prueba en la N-630), no se realiza la prefisuración de la capa reciclada. Hasta la fecha, no se han observado problemas importantes por reflexión de las fisuras transversales en las obras de reducido tráfico pesado, pero es una técnica necesaria para tráficos importantes (tráfico de categoría T2 o superior, por encima de 200 vehículos pesados/día/carril).

Los rendimientos medios obtenidos llegan hasta los 8.000 m<sup>2</sup> por día (unos 900 m<sup>2</sup>/hora), alcanzando rendimientos máximos de 1.500 m<sup>2</sup>/hora, aunque estos valores se ven ampliamente reducidos a medias de 5.000–6.000 m<sup>2</sup>/día cuando la planificación de la obra se complica por la necesidad de mantener el tráfico circulante, hay problemas con el suministro de cemento, o la anchura de la calzada obliga a muchas bandas solapadas, y por tanto muchas maniobras de los equipos.

### 2.9.6. Curado y protección

Mientras que en las carreteras de baja intensidad de tráfico muchas de las realizaciones se han llevado a cabo sin tráfico, desviando el mismo por otras rutas alternativas, en las carreteras principales el reciclado se ha realizado por bandas dando paso inmediato al tráfico o permitiendo su circulación pasadas algunas horas. Para ello tras el curado con un riego asfáltico (emulsión tipo ECI o ECR-1) se extiende un árido 3-6 mm de protección.



Fotos 33 y 34. Riego de curado y protección con árido

Por último, el período transcurrido desde el reciclado del firme existente hasta el extendido de la capa superior de mezcla bituminosa es muy variable de unas obras a otras, entre 1 o 2 semanas hasta 3 o 4 meses dependiendo de cada obra.

### 2.10. LOS COSTES

El coste de un reciclado del firme depende de varios factores como son(33):

- El volumen de material a reciclar y en particular:
  - o del espesor (a mayor espesor menor rendimiento)
  - o de la superficie (tanto de la forma, pues formas irregulares incrementan el número de maniobras de los equipos y reducen el rendimiento, como del tamaño, pues cuanto mayor sea menor serán los costes fijos por m<sup>2</sup> como el de transporte de los equipos).
- Las características del firme a reciclar (espesores de cada capa y naturaleza de cada material: cuanto más duro esté el material (pórfido o silíceo), más aglomerado haya y mayor tamaño tenga el árido, mayor desgaste de picas y menor rendimiento).
- El porcentaje de cemento a dosificar que tiene un doble efecto, por el coste del material y porque a mayor porcentaje menor rendimiento y mayor número de paradas para cargar el conglomerante. Una carga completa del dosificador de lechada puede durar alrededor de media hora, lo que puede suponer entre 2 y 3 horas sin reciclar de una jornada de trabajo.

Por supuesto también tiene influencia los equipos utilizados, pero en nuestro caso para calcular un coste orientativo consideraremos siempre el empleo de una recicladora del tipo Wirtgen WR 2500 alimentada por un distribuidor de lechada WM-1000.

Así considerando un rendimiento medio de 5.000 m<sup>2</sup>/día y un coste del cemento en obra de 90,00 €/t, los costes de ejecución material para reciclar 20, 25 y 30 cm de firme son aproximadamente los siguientes<sup>(34 y 35)</sup>:

Tabla 9. Costes de reciclar un firme

Espesor (cm)	Superficie (m <sup>2</sup> )	Equipos (€/m <sup>2</sup> ) <sup>(*)</sup>	Cemento		Coste (2008) €/m <sup>2</sup>
			3%	5%	
20	100.000	1,08	1,19	1,98	2,27 – 3,06
	50.000	1,20			2,39 – 3,18
25	100.000	1,32	1,49	2,475	2,81 – 3,80
	50.000	1,47			2,96 – 3,95
30	100.000	1,55	1,78	2,97	3,33 – 4,52
	50.000	1,73			3,51 – 4,70

<sup>(\*)</sup> incluido transporte (unos 0,08 €/m<sup>2</sup> por 200 km), amortización, personal y gastos (unos 6.500 €/día) y desgastes (unos 0,20 €/m<sup>2</sup>)

A este coste habría que añadir los correspondientes a la emulsión de curado, el riego de protección y por supuesto los gastos generales e impuestos correspondientes para tener el total de la unidad de obra.



## CAPÍTULO 3



**INVESTIGACIONES PREVIAS. CARENCIAS.  
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**



### **3. INVESTIGACIONES PREVIAS. CARENCIAS. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Se ha llevado a cabo un largo proceso de recopilación de todos los estudios realizados con materiales reciclados de firme con cemento y publicados, tanto en internet, como en cualquiera de los Congresos o Simposios internacionales realizados al respecto. Ante la carencia de un completo análisis que determine con precisión el comportamiento de este tipo de capas de firme, se han realizado los ensayos que sirven de base a esta tesis doctoral.

#### **3.1. ANÁLISIS DE LA BIBLIOGRAFÍA EXISTENTE**

No se han encontrado a penas referencias de investigaciones realizadas en laboratorio sobre firmes reciclados in situ con cemento que pretendan caracterizar todas sus propiedades mecánicas y definir estructuralmente a fatiga el material, aunque se han realizado muchos estudios de obra, ensayos sobre comportamiento y análisis de la evolución de la resistencia a compresión del material.

A nivel internacional cabe resaltar los trabajos realizados en Grecia por S. Kolia, M. Katsakou y V. Kaloidas y presentados en el 1<sup>er</sup> y 2<sup>o</sup> Simposio Internacional sobre estabilización de explanadas y reciclado in situ de firmes con cemento (Salamanca 2001 y Paris 2005) bajo el título “Mechanical Properties of flexible pavement materials recycled with cement”<sup>(36)</sup> y “Mechanical Properties of mixture of milled bituminous materials and crushed aggregates recycled with bitumen emulsion and cement”<sup>(37)</sup>.

En este trabajo se examinan en el laboratorio las propiedades mecánicas del material obtenido como combinación en diferentes proporciones de mezclas bituminosas fresadas junto con áridos de machaqueo y una dotación de 3% y 5% de cemento. Se realizan ensayos de compresión, tracción uniaxial y flexotracción en probetas con edades de 1 y 60 días, a fin de investigar la influencia del contenido de los materiales bituminosos fresados en la resistencia y en el módulo de elasticidad, considerándose que, como el espesor de las capas bituminosas y granulares no es siempre constante, las proporciones de estos materiales en la mezcla reciclada variarán a lo largo de la obra.

Además, se examina el efecto de la temperatura de las muestras durante la realización de los ensayos a compresión (sobre probetas cúbicas) y a tracción indirecta (sobre probetas cilíndricas) y se llevan a cabo ensayos de fatiga a flexotracción, cuyos resultados se analizan en comparación con los obtenidos con materiales granulares convencionales tratados con cemento en lo que se refiere a la susceptibilidad al agrietamiento, tanto bajo movimientos térmicos coartados, como bajo cargas de tráfico.

También hay que destacar los trabajos realizados por P. Moreira, R. Simoes, P. Peresca y A. Gomes, “Recycling of bituminous pavement with Portland cement- Portugalis experiences and advances”<sup>(38)</sup>, y por J. Abdo, J. Christory y D. Sicard, “Recycling of milled asphalt concrete as aggregate of road cement concrete”<sup>(39)</sup>, presentados en el citado 2º Simposio Internacional TREMTI (Paris 2005) y en los que se estudia la evolución de las resistencias a compresión del material reciclado y su módulo con diferentes proporciones de mezcla bituminosa. Este aspecto es abordado también por los investigadores griegos Kolias, Katsakou, Karaholios y Kirkili en la comunicación “The influence of the milled bituminous material content on the mechanical properties of cement recycled flexible pavement materials”<sup>(40)</sup>, pero en todos estos estudios no se investiga el comportamiento del material a flexotracción o a tracción indirecta, ni se determinan las leyes de comportamiento.

G. Vorobieff en “Australian experiences on subgrade stabilisation and pavement recycling”<sup>(41)</sup> expone la experiencia australiana en el reciclado de firmes, que se basa en el gran número de estabilizaciones realizadas desde los años 60. Aunque se incluyen interesantes datos sobre el módulo de los suelos estabilizados con diferentes conglomerantes (2.000 a 5.000 MPa), el coeficiente de Poisson (0,20) y la ley de fatiga empleada en el cálculo (obtenida para ejes de 8,2 toneladas), no se han determinado dichos valores para el material reciclado.

Rosberg K.<sup>(42)</sup>, ha empleado en Alemania el ensayo de tracción indirecta para determinar las propiedades mecánicas, midiendo la deformación en sentido perpendicular al de aplicación de la carga, pero siempre sobre un reciclado mixto con cemento y emulsión bituminosa. Incluso ha realizado ensayos dinámicos, sometiendo algunas probetas a un millón de ciclos con el objetivo de determinar la influencia de los diferentes contenidos de cemento y betún sobre la durabilidad.

Similares estudios ha realizado Houben L.<sup>(43)</sup> en Holanda sobre un reciclado mixto, determinando una ley de fatiga por medio de la teoría de formación de fisuras y los resultados de ensayos de tracción indirecta de testigos extraídos en 4 carreteras, además de probetas de laboratorio compactadas con la máquina giratoria. Deduce que los resultados de ensayo dependen de la temperatura y de la frecuencia de carga (comportamiento habitual de los materiales bituminosos), pero respecto a la formación de fisuras y a la resistencia a fatiga, el material reciclado con cemento y emulsión bituminosa se comporta de forma más parecida a un material reciclado con cemento.

También se han encontrado estudios en los que se determina la ley de fatiga y el comportamiento de un suelo estabilizado con cemento, como el de P. Garnica, N.y A. Perez “fatigue test on a lime stabilized soil”<sup>(44)</sup> presentado en el 3º Simposio Internacional de tratamiento y reciclado de materiales para obras de infraestructura de transporte TREMTI (Antigua Guatemala 2009). Los resultados no son trasladables a un material reciclado, pero se han recogido algunas de las ideas clásicas demostradas en este estudio, como que el material aguanta un número mayor de ciclos de carga y tiene mayor resistencia si se compacta con mayor energía.

Se ha consultado muchas otras publicaciones obteniéndose un gran número de datos muy interesantes, pero no se ha definido la relación entre la resistencia a compresión a corta edad exigida y controlada en obra con el resto de propiedades mecánicas a largo plazo que definen estructuralmente el comportamiento del material reciclado con cemento. Cabe citar “Technical guidelines for in situ recycling of base course in Japan”<sup>(45)</sup> de T.Yoshida, donde se exponen las prescripciones japonesas que coinciden con las españolas en cuanto a la resistencia a compresión exigida de 2,5 MPa en el material reciclado (en Japón se exige 3,0 MPa para bases tratadas).

A nivel nacional resulta muy interesante el “Estudio de testigos. Tramo Cañaverl sur – límite provincia con Salamanca, N-630”<sup>(46)</sup> realizado en abril de 1996 por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas CEDEX para la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, presentado de forma resumida por José Manuel Blanco Segura en la 4ª sesión técnica de las VI Jornadas de Conservación de Carreteras<sup>(47)</sup> (Murcia, 4 a 6 de junio de 1997) y a cuyo documento completo se ha tenido acceso, así como la comunicación “Retratamiento con cemento de firmes existentes”<sup>(31)</sup> presentada por Juan Peña Suárez en la 3ª sesión de las IV Jornadas sobre Pavimentos de Hormigón (Oviedo, 29 de septiembre a 1 de octubre de 1993).

## **3.2. PROGRAMA EXPERIMENTAL DE KOLIAS, KATSAKOU Y KALOIDAS**

### **3.2.1. Programa**

A las diferentes proporciones de material bituminoso y material granular que se combinan en una obra de reciclado se suma un segundo efecto que diferencia a los materiales reciclados de los materiales granulares tratados con cemento: la incorporación de áridos cubiertos con betún y aún más importante, la aportación de finos enlazados con betún, considerablemente diferentes a los áridos convencionales puesto que alteran las características del enlace y permiten una mayor deformación. La cantidad de estos en la mezcla reciclada altera perceptiblemente las características del material reciclado. El grado de cambio dependerá de la proporción de materiales bituminosos en la mezcla.

En este trabajo se investiga la influencia de las proporciones de materiales bituminosos (MB) y granulares (MG) en las características mecánicas de los materiales reciclados con cemento, en el que participan 3 laboratorios.

Los áridos de piedra caliza (AC) y la mezcla bituminosa (MB), procedentes de los trabajos de la reparación de un pavimento, fueron combinados en el laboratorio en las siguientes proporciones en masa 100/ 0, 75/25, 50/50, 25/75 y 0/100 para reproducir la gama entera de combinaciones de los materiales que pueden ser obtenidos con el reciclado con cemento.

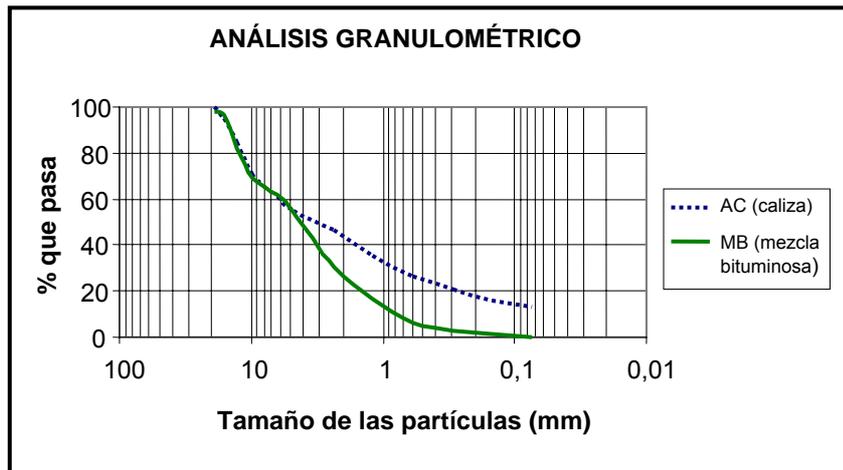


Figura 7. Análisis granulométrico del material a reciclar

Estas mezclas se denominan I, II, III, IV y V. Las granulometrías de AC y MB se muestran en la figura 7. Se realizan los ensayos con el 3 y 5% (en masa de los materiales secos) de cemento Portland CEM II B-M/32,5 y un 5,2% de agua. La primera cantidad de cemento representa la mínima aceptada por muchas especificaciones, y la segunda, un porcentaje en la gama más alta de los porcentajes usados en la práctica.

El programa experimental incluyó la determinación a 1 y 60 días de:

- La resistencia a compresión (cubo de 10 cm y trozos de prismas) con carga constante de 0,058 MPa/s.
- La resistencia a tracción uniaxial (prismas 10 x 10 x 50 cm) en dispositivo especial con velocidad constante de deformación de 2,0 mm/min a edades tempranas y en prensa con mordaza de tijeras en el resto.
- La resistencia a flexión (prisma 10 x 10 x 40 cm) a velocidad constante de 0,06 MPa/s, determinando la curva tensión – deformación y el módulo a flexión.
- La resistencia a tracción indirecta (probeta Ø10 x 20 cm) con una velocidad de 0,06 MPa/s según norma prEN 112362.
- El módulo de la elasticidad (en compresión uniaxial, tracción uniaxial y flexión).

El efecto de la temperatura en la resistencia a compresión fue investigado, en probetas cúbicas y cilíndricas con edades de 2 ó 3, 7 y 60 días sometidas durante 24 horas a 0°C, 20°C y 35°C. El programa también incluyó pruebas de fatiga a flexión en probetas de 10 x 10 x 40 cm a 60 días para las mezclas I (100/0), III (50/50) y V(0/100) con un contenido de cemento del 3% y del 5%. La carga sinusoidal a una frecuencia de 10 Hz se realizó a 23°C, con un mínimo de carga de 0,1 kN y una carga máxima entre 85% y 60% de la carga de rotura cuasi estática.

### 3.2.2. Resultados

Las figuras 8, 9 y 10 muestran la influencia del contenido de material bituminoso (MB) en las resistencias a compresión, tracción y flexión.

Los resultados a compresión coinciden con los de una investigación anterior y con los obtenidos por otro laboratorio en el marco de este programa, pero no sucede lo mismo con la resistencia a la tracción (que con el 5% de cemento no cambia hasta contenidos del 50% de MB y disminuye con mayores contenidos y con el 3% de cemento aumenta con el mayor contenido de MB hasta un valor que decae de 75% para un laboratorio y 25% para otro).

En cuanto al módulo de elasticidad en tracción, así como en compresión y flexión (figura 11), este se reduce a medida que el contenido de MB se incrementa. Este comportamiento puede atribuirse a los bajos valores del módulo del mortero bituminoso y a las grandes deformaciones producidas en la interfaz de los áridos cubiertos con partículas de betún y cemento.

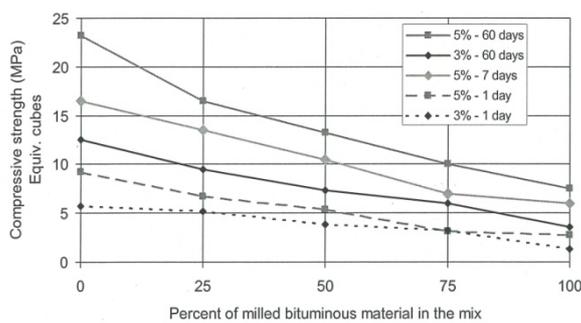


Figura 8. Efecto del porcentaje de MB en el ensayo de compresión

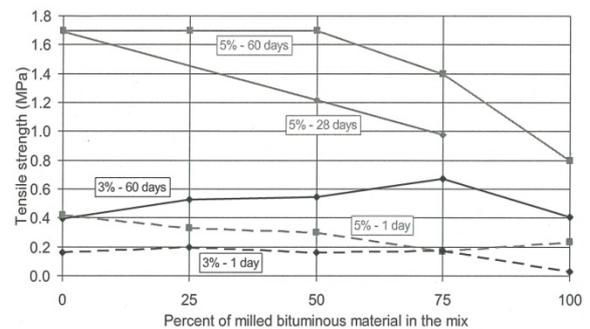


Figura 9. Efecto del porcentaje de MB en el ensayo de tracción

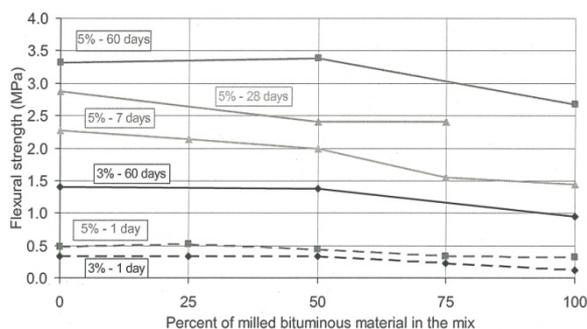


Figura 10. Efecto del porcentaje de MB en el ensayo de resistencia a la flexión

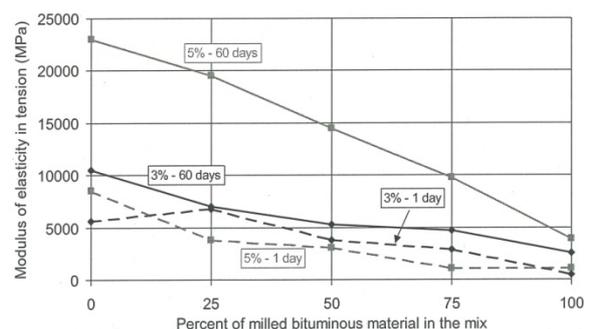


Figura 11. Efecto del porcentaje de módulo de elasticidad en tracción

El efecto de la temperatura sobre la resistencia es mayor a medida que el contenido de MB aumenta, pero hay que señalar que en la mayoría de los reciclados el contenido de MB raramente es superior al 50%. A medida que la temperatura disminuye, la resistencia es algo

mayor, debido al incremento de resistencia de las partículas de MB a temperaturas más bajas. En general, el efecto de la temperatura en el diseño de los pavimentos reciclados es muy pequeño. Esto puede explicarse por el hecho de que la disminución de resistencia que conlleva el aumento de la temperatura ambiente se acompaña de una disminución del módulo de elasticidad del material y, por lo tanto, las tensiones inducidas en la parte inferior de la capa de reciclado también disminuyen.

Los resultados de fatiga se muestran en la figura 12 para los materiales 100/0, 50/50 y 0/100, aunque el resultado no puede considerarse en términos cuantitativos dado el escaso número de muestras sometidas a la prueba. A medida que el contenido de MB aumenta, la línea de fatiga se desplaza hacia la izquierda y pasa a ser más empinada.

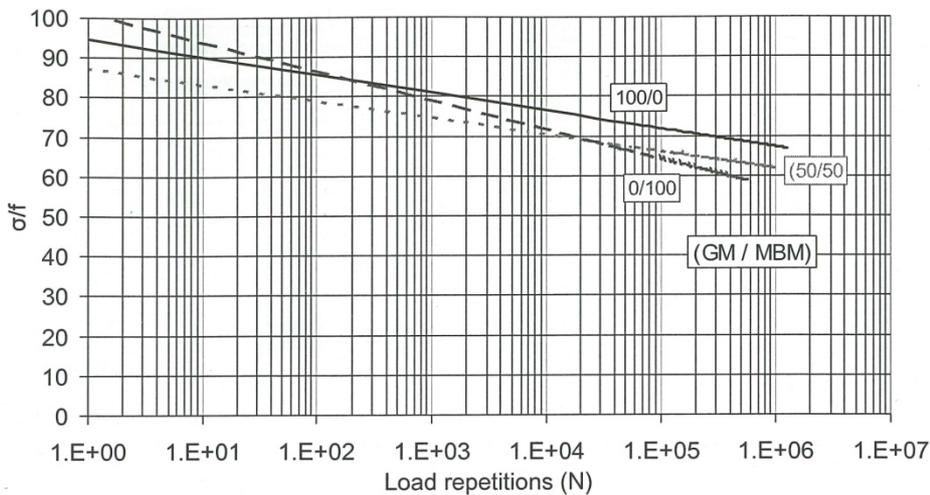


Figura 12. Resultados de fatiga para las mezclas I(100/0), III (50/50) y V (0/100)

Para el material granular (mezcla I, 100/0) la deformación permanente aumenta rápidamente con los primeros ciclos de carga y gradualmente se estabiliza en  $N = 10^5$ , para aumentar a partir de  $N = 6,5 \times 10^5$  hasta la rotura para  $N = 10^6$ . La deformación elástica recuperable es constante hasta  $N \approx 5 \times 10^5$  después de la cual empieza a aumentar, lo que indica que la rigidez de la muestra está disminuyendo, y se atribuye a la iniciación y propagación de grietas. La tasa de deformación elástica se hace mayor a medida que la probeta se aproxima a la rotura. El comportamiento del material bituminoso (V 0/100) es diferente, ya que la deformación permanente y la deformación elástica recuperable aumentan continuamente hasta la rotura. Esto se debe principalmente a la gran cantidad de partículas de mortero bituminoso que actúan bajando el módulo del reciclado y permitiendo mayor deformación a la que contribuyen los áridos cubiertos con betún. El comportamiento de la mezcla III (50/50) es intermedio entre ambos. Es evidente que cuanto mayor sea el contenido de MB en un reciclado, más grandes serán las deformaciones permitidas y el comportamiento del material reciclado cada vez más se regirá por las propiedades mecánicas de la MB.

La susceptibilidad al agrietamiento debido a la temperatura de los materiales con cemento disminuye a medida que aumenta la relación resistencia a tracción – módulo de elasticidad, y en este caso disminuye a medida que aumenta el contenido de MB.

La susceptibilidad al agrietamiento provocada por el tráfico se rige por la relación módulo de elasticidad – resistencia a tracción, ya que las cargas incluidas por el tráfico dependen de la capacidad de cargas de la capa reciclada, que está relacionada con su módulo. A medida que aumenta el contenido de MB, el citado ratio  $E/R_F$  disminuye, por lo que para la misma carga de tráfico, la relación  $E/R_F$  o el ratio  $\sigma/R_F$  se reduce.

### **3.2.3. Conclusiones**

Los materiales obtenidos en el reciclado de un firme con diferentes proporciones de materiales granulares y mezclas bituminosas tienen propiedades específicas que son beneficiosas para el diseño del pavimento y su comportamiento, siempre que se tengan debidamente en consideración:

1. La resistencia a compresión y el módulo de elasticidad se reducen con el contenido de MB.
2. La resistencia a flexión, tracción uniaxial, y tracción indirecta no disminuyen para contenidos bajos de MB, pero lo hacen rápidamente para contenidos mayores (afirmación aplicable a los materiales utilizados en la prueba pero que requiere ser comprobada con otros materiales).
3. La resistencia a compresión y a tracción es mayor a medida que la temperatura es más baja. El efecto de la temperatura sobre la resistencia es cada vez mayor a medida que el contenido de MB en la mezcla aumenta.
4. En comparación con otros materiales tratados con cemento, la línea de fatiga se mueve a la izquierda y pasa a ser más pronunciada con el aumento del contenido de MB. Es necesaria una investigación más profunda a fin de establecer relaciones cuantitativas a fatiga con diversos contenidos de MB.
5. La susceptibilidad al agrietamiento debida a los movimientos restringidos o a las cargas de tráfico reduce a medida que aumenta el contenido de MB.

### **3.3. ESTUDIO DE TESTIGOS TRAMO CAÑAVERAL SUR – LÍMITE DE PROVINCIA DE SALAMANCA. N-630**

#### **3.3.1. Informe del CEDEX**

En abril de 1996 el CEDEX emite un informe sobre el estudio de los 13 testigos extraídos en el tramo reciclado in situ con cemento Cañaverál sur – L.P. Salamanca de la carretera N-630, Ruta de la Plata, a su paso por la provincia de Cáceres.

Se trata del reciclado de un tramo de 32 km y una profundidad de 25 cm (explanada del tipo E2), que se incrementa a 30 cm donde la explanada es de peor calidad (E1), sobre los que se extienden inicialmente 10 cm de mezcla bituminosa. En ambas márgenes se aportan 40 o 55 cm de zahorra artificial según tramos sustituyendo al firme existente, dado su mal comportamiento por escasa capacidad. El reciclado se realiza con un 5% de cemento II-F 35.

Los testigos después de serrados se refrentan con azufre y se ensayan para medir el módulo dinámico de acuerdo con la norma NLT-349/90<sup>(48)</sup> a tres temperaturas (-10, 20 y 40°C) y la resistencia a compresión según NLT-305/90<sup>(49)</sup>.

En el informe se citan las características generales y se correlacionan las cualidades medidas. Cabe destacar:

La resistencia a compresión viene definida por la tensión de compresión que produce la rotura de la probeta. En muchos materiales de carreteras la rotura se debe principalmente a la pérdida de la cohesión que existe entre las partículas de árido. Si la cohesión es debida a un ligante hidráulico, la resistencia puede ser alta, aumenta con su contenido y con la densidad del material y no depende de la temperatura. Si el ligante es hidrocarbonado la resistencia depende de la temperatura y con temperaturas altas tiene valores bajos. Si no existe ligante, la cohesión es debida a la humedad, la resistencia es baja y depende poco de la temperatura.

El módulo dinámico es la relación de la amplitud de tensión a la amplitud de deformación que se produce en un ciclo de sollicitación dinámica. Las deformaciones son debidas a las que se producen en los áridos, y sobre todo, a los corrimientos intergranulares. El módulo dinámico depende mucho del tipo de contacto intergranular que exista. Si existe cemento en los contactos intergranulares se obtienen módulos elevados que dependen poco de la temperatura y la frecuencia de sollicitación. Si existe un ligante hidrocarbonado, el módulo depende mucho de la temperatura y frecuencia. Si no existe ningún ligante, el módulo es bajo y depende poco de la temperatura y frecuencia.

El coeficiente de densidad de energía disipada se obtiene a partir de los valores del módulo dinámico y el ángulo de fase, de acuerdo con la expresión  $CDED = 10^6 \cdot \text{sen}(\phi)/E$ , donde  $\phi$  es el ángulo de fase y E el módulo dinámico. Es por tanto, un parámetro proporcional a la cantidad de energía que se ha disipado en forma de calor, en un ciclo de sollicitación dinámica.

De los resultados obtenidos se establecen entre los testigos 3 grupos diferenciados que resumidamente se definen según sus características de resistencia a compresión  $R_c$ , módulo dinámico  $E$  a 10 Hz y 20°C y coeficiente densidad de energía disipada CDED a 10 Hz y 20°C:

Tabla 10. Clasificación de los testigos extraídos en la N-630

Grupo	A	B	C
Nº testigos	5	6	2
$R_c$ (MPa)	> 7,5	5 a 7,5	< 5
$R_c$ variación	7,51 a 10,43	5,07 a 7,02	4,21 y 4,88
$E$ (GPa)	> 9	5 a 9	< 5
$E$ variación	11,148 a 12,348	5,442 a 8,115	2,909 y 4,330
CDED ( $\text{TPa}^{-1}$ )	< 7	7 a 20	> 20
Comportamiento	Próximo a una graveceamiento	Muy afectado por el betún presente en el reciclado	Similar a una zahorra con bastante cohesión

En el informe se incluye un gran número de figuras relacionando todos estos parámetros a las 3 temperaturas ensayadas (-10, 20 y 40°C) y frecuencias (5, 10 y 20 Hz). La relación entre el módulo dinámico (20°C, 10 Hz) y la resistencia a compresión (20°C) se puede expresar con un polinomio de segundo grado (coeficiente de correlación  $R^2 = 0,93$ ):

$$E = -8.992,96 + 3.464,426 R_c - 136,889 R_c^2$$

En su conjunto se observa una gran dispersión en las características mecánicas de los testigos, que se achaca a la técnica, las características de la obra y el reducido número de testigos analizados.

### **3.3.2. Comunicación de J. M. Blanco en las VI Jornadas de Conservación de Carreteras**

Resulta muy interesante las explicaciones aportadas por José Manuel Blanco Segarra, entonces Ingeniero Jefe de la Unidad de Carreteras de Cáceres, no sólo sobre la obra y su comportamiento, sino también sobre las dispersiones citadas, en su comunicación presentada en la 4ª sesión técnica, Técnicas de Conservación de Carreteras de las VI Jornadas de Conservación de Carreteras celebradas en Murcia, del 4 al 6 de junio de 1997.

De acuerdo con los múltiples datos aportados, los testigos tienen características totalmente diferentes según la zona de la sección transversal donde se haya extraído: los 6 m centrales de carretera habían sido ensanchados con estrechas franjas escasamente afirmadas con 20 cm de materiales granulares y una o dos capas de mezcla bituminosa en frío, que se retiraron disponiéndose 40-55 cm de zahorra artificial en ambas márgenes (hasta 10 m de ancho) para reciclar 8 m de anchura con una profundidad de 25-30 cm (según tramos).

Así, en los 4 m centrales de la carretera se reciclaba exclusivamente material antiguo de la misma, mientras que en los bordes exteriores se reciclaba además un 50% de zahorra

artificial, en ambos casos con un 5% de cemento II-F 35, lo que justifica la variabilidad de los resultados obtenidos.

Las resistencias medias a compresión obtenidas en obra (145 series de 9 probetas/serie) fueron 2,22 MPa, 2,71 MPa y 3,15 MPa a 7, 28 y 90 días respectivamente. Estos valores resultan muy bajos comparados con los 55 testigos extraídos, en los que se puede diferenciar las siguientes resistencias:

Resistencia media 55 testigos	=	4,62 MPa
R. media zona central 36 testigos	=	4,28 MPa
R. media zonas exteriores 19 testigos	=	5,27 MPa

Los datos confirman que la resistencia alcanzada en las zonas exteriores es más alta que en las interiores, siendo dicho incremento del orden de un 23%.

El hecho de que la resistencia de los testigos sea superior a la obtenida en las probetas, el autor lo imputa a los siguientes dos motivos:

- Las probetas se compactaban al 97% del Proctor modificado, mientras que las densidades realmente alcanzadas en la obra han sido ligeramente superiores.
- El ensayo de rotura a compresión se ha realizado únicamente en los testigos que se extraían sin defecto alguno, por lo que la muestra estaba sesgada al alza y ello explicaría un incremento adicional de las resistencias obtenidas.

De acuerdo con esto, las resistencias de las probetas deberían ser corregidas y la resistencia real obtenida a 7 días es un valor en torno a 2,5 – 3,0 MPa, siendo de 3,5 – 4,3 MPa a 90 días.

El autor destaca que se habrían obtenido resultados más fiables si se hubiese tomado la precaución en obra de haber realizado series adicionales de probetas, compactadas a diferentes porcentajes de la densidad Proctor modificado, a fin de determinar la correlación densidad/resistencia.

Una correlación similar habría que aplicar para obtener el módulo medio real en obra. Según el autor los módulos medidos son superiores y la muestra está sesgada al alza, al igual que la resistencia de los testigos. En los 13 testigos que se ha calculado el módulo se obtiene una resistencia a compresión media de 7,16 MPa, notablemente superior a la de los 55 testigos obtenidos tras las obras (4,62 MPa) y muy superior a la media real de obra que se estima entre 3,5 y 4,3 MPa.

Esto se debe a que los módulos se midieron en los testigos de mejor aspecto. Además se debería separar entre los testigos obtenidos en el centro o en los lados exteriores, donde se aportó un 50% de zahorra artificial, además de diferenciar por tramos según las características del material reciclado. Los resultados obtenidos fueron:

Tabla 11. Resultados de testigos extraídos en el reciclado de la N-630

Zona y tramo	Testigo n°	E (MPa)	R <sub>c</sub> (MPa)
Central (IV)	1	2.900	4,2
Central (I)	2	4.300	4,9
Central (V.3)	3	6.300	5,3
Central (I)	4	12.100	6,9
Central (V.I)	5	10.700	7,5
Central (I)	6	11.600	9,7
Central (I)	7	7.900	10,4
Exterior (V.1)	8	6.000	5,1
Exterior (V.1)	9	5.000	5,9
Exterior (V.1)	10	6.900	6,8
Exterior (V.3)	11	8.500	7,0
Exterior (I)	12	10.500	9,0
Exterior (I)	13	12.200	10,4
Valor medio ...		8.069	7,2

La media de los módulos medidos es 7.971 MPa en los testigos de la zona central y 8.183 MPa en los extraídos en las bandas exteriores con unos valores de resistencia media de 6,99 y 7,37 en zonas central y bandas respectivamente. El autor hace una correlación con las resistencias reales de cada zona, reduciendo el valor de dichos módulos a órdenes de magnitud de 2.200 y 4.000 MPa respectivamente.

La media de la relación módulo/resistencia a compresión ( $E/R_c$ ) es 1.127,5 en la zona central y 1.098,8 en los bordes, muy similares pero con mucha mayor dispersión en la zona central, debido lógicamente a la mayor heterogeneidad de materiales.

### 3.3.3. Nuevos datos del material reciclado

En el año 2010, después de 15 años desde la realización de la obra, se ha llevado a cabo una campaña de testigos y medición de módulos dinámicos extrayéndose un total de 20 testigos del material reciclado con 10 cm de diámetro y longitud variable que, para los ensayos, se ha cortado en el laboratorio posteriormente a 20 cm.

Los 10 testigos rotos posteriormente a compresión se han ensayado con una amplitud de carga dinámica de 12 kN y una frecuencia de 10 Hz a temperatura constante 20°C. Los resultados de los testigos han sido:

Tabla 12. Módulos y resistencias a compresión obtenidos en testigos del año 2010

Testigo	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo dinámico (MPa)	Resistencia compresión (MPa)
T3CR3	2,080	4592	5,79
T5CR	2,195	15612	12,10
T6LR	2,021	13101	10,49
T8LR	2,015	-	8,69
T9CR1	2,131	7032	5,91
T10CR1	2,171	6575	5,52
T11CR	2,260	13527	12,28
T12CR1	2,213	10165	9,88
T21CR	2,112	9872	5,43
T22M	2,050	10581	5,16

La relación entre el módulo y la resistencia a compresión viene definida por la siguiente ecuación lineal ( $R^2 = 0,6565$ ):

$$E = 952,8 \cdot R_c + 2.436$$

siendo la representación gráfica la siguiente:

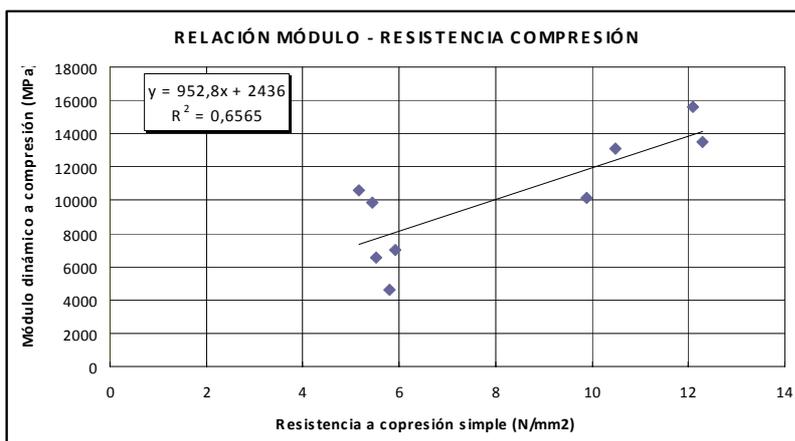


Figura 13. Relación entre módulos y resistencias a compresión obtenidos en testigos del año 2010

Además se han ensayado otros 10 testigos de altura variable a tracción indirecta calculándose su módulo. La amplitud de la carga dinámica es variable, siendo la frecuencia 2,4 Hz y la temperatura 20°C. Los resultados han sido:

Tabla 13. Módulos y resistencias a tracción indirecta obtenidos en testigos del año 2010

Testigo	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo dinámico (MPa)	Resistencia tracción indirecta (MPa)
T1CR2	2,035	5006	0,38
T3CR3	2,130	10662	0,87
T6LR	2,100	12421	1,72
T7CR	1,915	10314	0,64
T8LR	2,274	30447	2,31
T13LR1	1,931	7239	0,63
T14LR1	1,907	6489	0,55
T21CR	1,894	7531	0,62
T22M	2,203	15389	1,47
T23LR	2,042	13855	1,21

La relación viene establecida por la siguiente ecuación lineal ( $R^2 = 0,8348$ ):

$$E = 10.716 \cdot R_{ci} + 782,1$$

### 3.4. ESTUDIO DEL TRAMO HUELVA – CARTAYA. N-431

Juan Peña Suárez, (Demarcación de Carreteras del Estado en Andalucía Occidental) presentó en las IV Jornadas sobre Pavimentos de Hormigón (Oviedo, 29-30 de septiembre y 1 de octubre de 1993) un resumen de los resultados del estudio del reciclado de la carretera N-431 en el tramo Huelva – Cartaya, que se recoge en el informe técnico del CEDEX “Tramo de ensayo de reciclado in situ con cemento en la carretera N-431 (Huelva – Ayamonte)”.

El reciclado de la carretera se realizó con un 4,5% de cemento tipo V-35 en una profundidad de 30 cm de un firme cuyas capas variaban desde 5 hasta 25 cm de mezclas bituminosas sobre unos 15 cm de zahorra artificial y 15 cm de zahorra natural.

Se extrajeron 54 testigos de los que sólo se pudo ensayar a compresión 29, obteniéndose una resistencia superior a 4 MPa en 25 de ellos. En 12 testigos se midieron los módulos dinámicos, obteniéndose un valor medio de 6,275 MPa. Los resultados fueron:

Tabla 14. Resultados de testigos extraídos en el reciclado de N-431

Testigo nº	Rc (MPa)	E (MPa)
1	2,7	3.600
2	11,2	4.000
3	11,9	11.200
4	9,5	10.900
5	6,7	4.800
6	5,6	5.200
7	6,2	7.400
8	10,9	7.400
9	8,9	7.000
10	6,8	3.500
11	4,8	5.300
12	8,3	5.100
Valor medio	7,79	6.283

### 3.5. RECOPIACIÓN DE DATOS DE OBRAS

Considerando la dificultad de recoger los datos de todas las obras de reciclado realizadas in situ en España y la enorme variedad de casos en un territorio tan extenso, se ha centrado esta fase de recopilación de información en los reciclados realizados en Castilla y León. Hay que hacer indicar no obstante, que en esta extensa comunidad de 94.147 km<sup>2</sup> se han realizado más del 50% de los reciclados in situ con cemento llevados a cabo en toda España.

Así pues, se ha recogido en la ficha resumen de características homogéneas todos los datos disponibles de las obras de reciclado llevadas a cabo en Castilla y León.

La documentación de muchas de estas obras ocupa varias carpetas clasificadoras con un elevado número de datos de ensayos y resultados que se ha procedido a analizar, elaborando una ficha de una forma clara, concisa y homogénea con el objetivo de disponer de los datos de cada obra, permitiendo su seguimiento y valoración de su comportamiento.

Las fichas constan de un primer cuadro de datos generales con el lugar de ubicación de la obra, la caracterización del tráfico, las características geométricas y la secciones de firme antes y después de reciclar.

En un segundo cuadro se recogen las características del material reciclado (dosificación, ensayos previos, granulometría, plasticidad, resultados del ensayo Proctor modificado y resistencias y densidades obtenidas en obra), los equipos empleados y su rendimiento, el proceso constructivo, el resto de materiales utilizados (emulsión de curado y características de las mezclas bituminosas) y la situación actual del firme.

Todas las fichas de las que se han podido obtener los datos, se incluyen en el anejo 1.

### **3.6. CARENCIAS. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Como se puede apreciar en la bibliografía investigada y en los estudios existentes, hasta la fecha no se ha realizado un detallado estudio de laboratorio que permita determinar con precisión la ley de fatiga del material reciclado, ni su comportamiento a largo plazo en el conjunto del firme.

Todas las secciones de firme se diseñan de acuerdo al cálculo obtenido con modelos de respuesta, (modelos matemáticos en los que es necesario introducir ciertos parámetros), y modelos de comportamiento, en los que se simula la evolución de acuerdo a unas leyes de agotamiento estructural por fatiga.

En el caso de los firmes reciclados in situ con cemento no se ha realizado hasta la fecha el estudio de laboratorio que avale los parámetros a introducir, ni se ha determinado la ley de comportamiento del material, por lo que se carece de normativa, o bien se asemeja el material a otro como el suelocemento, aunque su comportamiento pueda variar por la diferente estructura granulométrica y la existencia de árido envuelto con una película de betún residual.

Tampoco se ha definido la relación existente entre la resistencia a compresión a corta edad (7 días), que es la que se controla en las obras, con la resistencia a flexotracción a largo plazo, que es la que define el comportamiento estructural del material.

Se pretende pues con esta tesis doctoral intentar cubrir estas lagunas de conocimiento del material reciclado in situ con cemento.

## CAPÍTULO 4



### MEDIOS EMPLEADOS, MODELO DE ENSAYO Y PLANIFICACIÓN



## **4. MEDIOS EMPLEADOS, MODELO DE ENSAYO Y PLANIFICACIÓN**

Se describe a continuación tanto las características del material reciclado de la carretera SA-801 utilizado en los ensayos, como todos los equipos y prensas empleados. Además se incluye la metodología y el plan de trabajo establecido durante las dos etapas, en las que se han realizado los trabajos, distribuidas entre los años 2007 a 2010, y que han supuesto la realización de un total de 350 ensayos.

### **4.1. MATERIAL RECICLADO UTILIZADO EN LOS TRABAJOS**

Es evidente que el espesor de las capas bituminosas y granulares varía a lo largo de las carreteras y por tanto variará en proporción en el material reciclado, no solo de una obra a otra, sino en las diferentes secciones de la misma obra.

Se presenta por tanto una infinita variabilidad de materiales reciclados según la proporción de materiales bituminosos, el porcentaje de betún residual y el contenido y granulometría de los materiales granulares que formen el firme. Ahora bien, tanto la proporción material granular / bituminoso de 100/0, como la de 0/100 corresponden a productos que se asemejan a un suelocemento o gravacemento (según el árido) y a una mezcla bituminosa convencional o grava-emulsión, cuyos materiales y leyes de fatiga están ya estudiados y definidos.

Por todo ello se decidió buscar una obra donde se obtuviera un material con proporciones intermedias 2/3 de material granular y 1/3 de bituminoso, mucho más común en la mayoría de los casos, con el fin de caracterizarlo de acuerdo a un ambicioso programa de ensayos, dejando otras proporciones para otros estudios posteriores.



Foto 35. Material procedente de fresado de firme en acopio exterior



Foto 36. Material seco acopiado en el interior del laboratorio

El material utilizado en los ensayos procede del reciclado del firme en el pk 0+300 de la carretera SA-801, de Peñaranda de Bracamonte a Campo de Peñaranda. Este material se ha obtenido a partir del reciclado sin conglomerante de los 30 cm superiores de un firme compuesto de una capa superior de 10 cm de mezcla bituminosa y una base de 20 cm de material granular.

Se transportaron aproximadamente 2,5 t de material al Laboratorio de Materiales de la Escuela Politécnica Superior (Universidad de Burgos) que se acopiaron en el exterior. Con el fin de que no acumulara demasiada humedad y fuera muy costoso su secado, se dispuso un segundo acopio en el interior del laboratorio de menor volumen y una zona para su extendido. Primero se extendía el material sobre un plástico hasta que se observaba que había perdido toda su humedad, y posteriormente se acopiaba hasta el día de su uso. No obstante, en todos los casos se ha usado la estufa para el secado total antes de realizar los ensayos.

El tamaño máximo utilizado para la fabricación de las probetas es 40 mm, por lo que las partículas mayores se separaron con la ayuda del tamiz UNE 40. Los trozos mayores se machacaban ligeramente y se reincorporaban al conjunto.

La obra de la que se obtiene el material reciclado, carretera SA-801, pertenece a la Junta de Castilla y León. La empresa constructora es PAS (Pavimentos Asfálticos de Salamanca), quien encarga la unidad de reciclado a Conalber. Además del laboratorio de la propia empresa, interviene Euroconsult, obteniéndose en obra los siguientes resultados:

- Análisis granulométrico

Tabla 15. Granulometría del material reciclado

Tamiz (mm)	100	50	40	25	20	12,5	8	4	2	0,5	0,063
% pasa	100	100	100	85	80	68	61	51	44	24	6

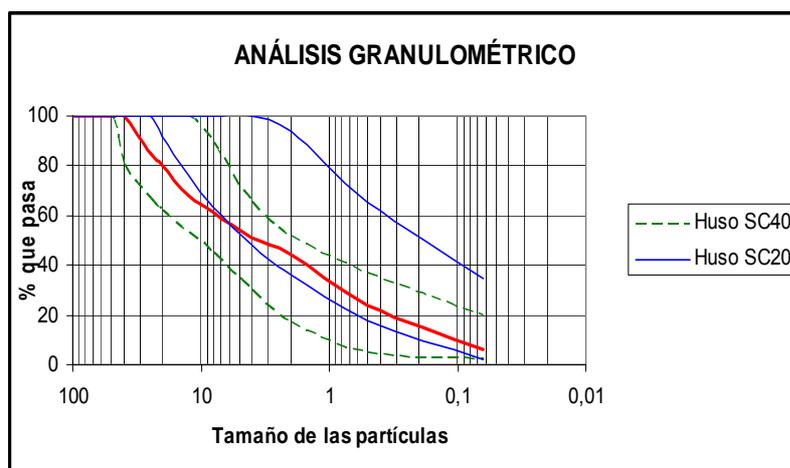


Figura 14. Análisis granulométrico

El contenido de finos de la muestra analizada de obra en julio de 2007, correspondiente a la cata tomada en el pk 12,000, es del 6%. Posteriormente en el laboratorio se comprueba esta

granulometría encontrando algunas variaciones. No obstante las granulometrías entran dentro del huso definido para el suelocemento SC40 en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales PG-3<sup>(50)</sup>, como puede apreciarse en la figura 14.

- Plasticidad

El material empleado es no plástico según las normas UNE 103103<sup>(51)</sup> y UNE 103104<sup>(52)</sup>. Para determinar la limpieza del árido fino (material que pasa por el tamiz de 2 mm), se realiza el equivalente de arena según la norma UNE 933-8<sup>(53)</sup>, obteniéndose un valor de 38.

- Composición química

El material esta exento de materia orgánica según la norma UNE 103204<sup>(54)</sup> y de productos que puedan perjudicar el fraguado del cemento según la norma UNE 103201<sup>(55)</sup>.

#### 4.1.1. Cemento

El cemento empleado tanto en la obra, como en los ensayos realizados para la fabricación de todas las probetas, es del tipo ESP VI-1 32,5 N procedente de la fábrica de La Robla (León) del grupo S.A. Tudela Veguin.

El cemento ESP VI-1 32,5 N tiene el distintivo de calidad AENOR y cumple con las especificaciones exigidas en la Instrucción de Recepción de Cemento RC-03<sup>(5)</sup> y en la norma UNE-EN ISO 9001<sup>(56)</sup>. Su composición es aproximadamente 50% clinker + 50% cenizas volantes de la térmica de La Robla. El cemento se transportó en 5 sacos de 20 Kg al laboratorio, con los que se realizaron la primera fase de ensayos. Posteriormente hubo que solicitar 5 sacos más para la segunda fase.



Foto 37. Muestra de cemento ESP VI-1 32,5 N

Los certificados de calidad del cemento empleado están incluidos en el anejo 6 Certificados de calidad de los materiales y equipos empleados.

#### 4.1.2. Agua

Se ha utilizado agua potable de la red de abastecimiento de la ciudad de Burgos. No ha sido necesario ensayar el agua ya que los laboratorios municipales de Burgos (servicio de aguas) han facilitado las características físico-químicas del agua empleada y se ha comprobado que las características del agua potable son validas para la ejecución del reciclado.

El análisis del agua y todos sus parámetros están incluidos en el anejo 6 Certificados de calidad de los materiales y equipos empleados.

#### 4.1.3. Desenconfante

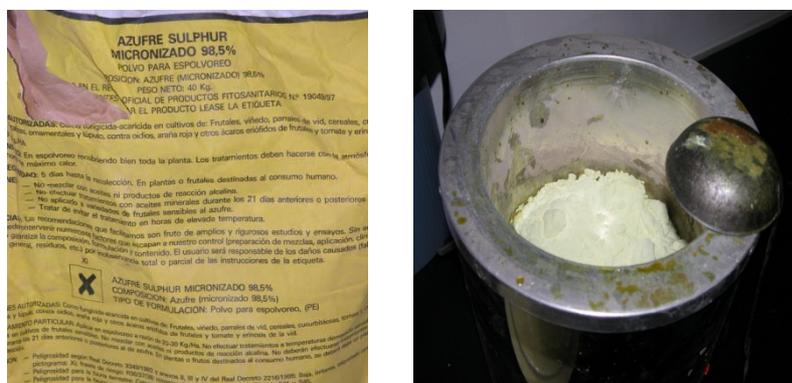
El desenconfante utilizado para permitir retirar bien los moldes de las probetas ha sido BETTODESMOLD H.



Fotos 38 y 39. Desenconfante y modo de aplicación

#### 4.1.4. Refrentado

Para refrentar las probetas se ha empleado azufre SULPHUR micronizado 98.5 % de PETROQUISA.



Fotos 40 y 41. Mezcla comercial de azufre y calentador



Foto 42. Refrentado de una probeta cilíndrica



Foto 43. Probeta cilíndrica refrentada con azufre

## 4.2. EQUIPOS

Para llevar a cabo los ensayos se han utilizado los siguientes equipos y aparatos:

### 4.2.1. Estufa

Se dispone de una estufa que alcanza una temperatura máxima de 300 °C que se usa para secar el material y obtener la humedad precisa para la elaboración del material reciclado para los ensayos.



Fotos 44 y 45. Estufa de secado, exterior e interior

### 4.2.2. Básculas

Para pesar con precisión los componentes gruesos de la mezcla definidos en la dosificación hace falta una báscula que admita un peso máximo elevado. Por ello se ha utilizado una báscula de 150 Kg de capacidad con una precisión de 20 gr. Esta prensa se emplea también para pesar las probetas prismáticas con o sin molde.



Foto 46. Báscula



Foto 47. Báscula de precisión

Para el cemento, con el fin de incrementar la precisión, se ha empleado una báscula de 20 Kg de peso máximo y precisión de 1gr. También se utiliza esta báscula para pesar las probetas cilíndricas una vez desmoldadas para determinar la densidad.

Los certificados de calibración de las básculas se muestran en el anejo 6 Certificados de calidad de los materiales y equipos empleados.

#### 4.2.3. Moldes

Para la fabricación de las probetas se han usado 9 moldes cilíndricos de 15,24 cm de diámetro y 17,78 cm de altura y 12 moldes prismáticos de dimensiones interiores 15 x 15 x 60 cm.



Fotos 48 y 49. Moldes cilíndricos y montaje de moldes prismáticos

#### 4.2.4. Amasadora

Para el amasado del hormigón se ha empleado una amasadora móvil de eje vertical de 80 cm de diámetro y 40 cm de altura, con una capacidad de 200 litros aproximadamente. Esta se ha

utilizado para realizar todo tipo de amasadas, tanto para las probetas cilíndricas, como para las prismáticas.



Foto 50. Amasadora de eje vertical

#### 4.2.5. Martillo vibrante Kango

Para la realización de las probetas cilíndricas se ha utilizado un martillo vibrante con contrapeso y guías, automatizado para que se pare en el tiempo programado. El martillo del que se dispone es el modelo Kango 900 kg y tiene las siguientes características:

- Potencia absorbida 1600 W.
- Energía de impacto 7 – 27 J.
- N° golpes bajo carga 975 – 1950 rpm.
- Peso con empuñadura auxiliar 11,0 kg.
- Designación 4933 3756 50
- Código EAN 4002395 23161 4



Foto 51. Martillo Kango y guías

#### 4.2.6. Mesa vibrante

Aunque inicialmente se buscó sin resultados la mesa vibrante que se empleó en el Instituto Eduardo Torroja para la elaboración de las probetas prismáticas de gravacemento en los ensayos realizados en los años 70 para estudiar la ley de fatiga de este material, se ha utilizado una mesa vibrante disponible en el laboratorio capaz de proporcionar una vibración de 40 Hz ó 2400 rpm, conectada a la corriente trifásica, cuyas fijaciones para los moldes se adaptaron.



Foto 52. Mesa vibrante

Para acoplar los moldes prismáticos a la mesa vibrante se emplean dos mordazas metálicas. Como se aprecia en la imagen, las mordazas disponen de unos topes o rigidizadores metálicos fabricados para la ocasión que impiden que estas se deslicen de la base del molde.



Fotos 53 y 54. Mordazas para la sujeción de los moldes a la mesa vibrante

#### 4.2.7. Equipo Proctor modificado

Para realizar el ensayo Proctor modificado según norma UNE 103501<sup>(21)</sup> se dispone en el laboratorio de transportes los moldes cilíndricos de 15,24 cm de diámetro y 12,70 cm de altura, con un volumen de 2318 cm<sup>3</sup>, junto al collarín de 5,08 cm de alto.

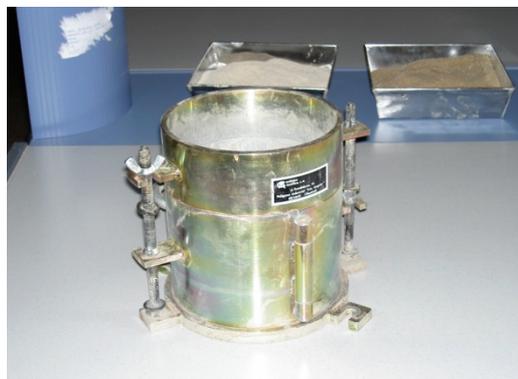
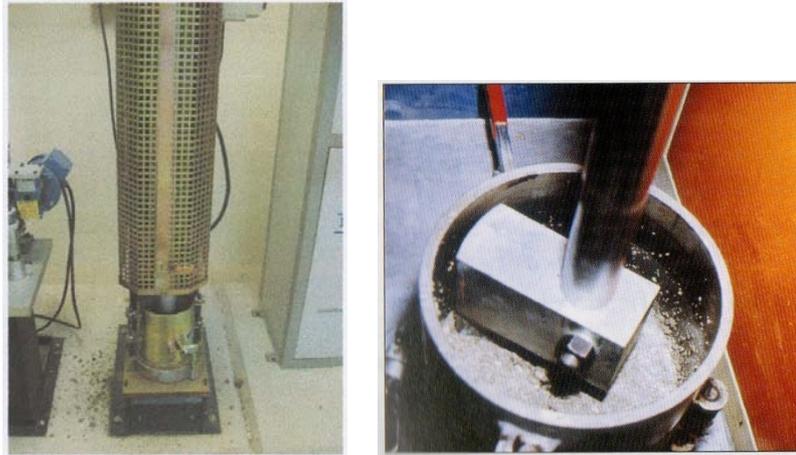


Foto 55. Molde y collarín para el ensayo Proctor Modificado

De acuerdo con a la norma UNE 103501<sup>(21)</sup> se emplea la maza Proctor para realizar el ensayo.



Fotos 56 y 57. Dispositivo para el ensayo Proctor y detalle de la maza

#### 4.2.8. Cámara de curado

Para un adecuado curado de las probetas de acuerdo con la norma UNE-EN 12390-2<sup>(57)</sup> en unas condiciones de 20 °C de temperatura y una humedad superior al 95 %, se guardan en una cámara húmeda disponible en el laboratorio, cuyas dimensiones interiores son 3 x 2 m, dotada de 4 pisos de bandejas que permiten guardar simultáneamente todas las probetas cilíndricas y prismáticas elaboradas, junto con las de otros estudios de investigación que se desarrollan en la Escuela.



Fotos 58 y 59. Cámara húmeda, interior y exterior



Foto 60. Control de la Cámara húmeda

#### 4.2.9. Equipo de refrentado

Para refrentar las probetas se utiliza el método del mortero de azufre definido en UNE-EN 12390-3<sup>(58)</sup>. Para ello, se emplea un calentador para calentar la mezcla de azufre para el refrentado y un marco de posicionamiento para probetas de 15 x 18 cm.



Foto 61. Calentador y marco 15 x 18 cm

#### 4.2.10. Prensas

Para la campaña de ensayos diseñada se han usado tres prensas diferentes. La primera corresponde a los ensayos de compresión simple y tracción indirecta (Modelo MEN 101/10 M4) y la segunda a los ensayos de flexotracción (Modelo MEN 101/SDC), ambos equipos de rotura según UNE-EN 12390-4<sup>(59)</sup>.

A continuación se muestran las características técnicas de ambas prensas:

Tabla 16. Características de la prensa para ensayos de compresión y tracción indirecta

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA PRENSA MEM-101/SDC	
Capacidad (Rango)	100 KN
Sentido de la fuerza	TRACC/COMP.
VARIABLES DE CONTROL	Fuerza y desplazamiento
Carrera	500 mm
Luz entre platos de compresión	1000 mm
Luz entre columnas	610
Calibre de las columnas	60 mm
Velocidad máxima en control por recorrido	60 mm/min
Velocidad mínima en control por recorrido	0,003 mm/min
Velocidad máxima en control por fuerza	1000 DaN/s
Velocidad mínima en control por fuerza	0,1 DaN/s
Resolución de la medida de fuerza	1 DaN/s
Resolución de la medida de recorrido	0,001 mm
Resolución de la velocidad en control por recorrido	0,001 mm/min
Resolución de la velocidad en control por fuerza	0,1 DaN/s
Aceleración máxima	$10^{-3}$ m/s
Clase de precisión de la medida de fuerza	0,50%
Clase de precisión de la medida de recorrido	0,50%
Estabilidad de la medida en función del tiempo	<0,5%/mes
Estabilidad de la medida en función de la temperatura	<0,01 %/°C
Sistema de medida de fuerza	Célula de carga
Dimensiones	1900x1500x500 mm
Peso aproximado	550 kg
Alimentación	220 V (2 fases)
Potencia máxima	1 KW



Fotos 62 y 63. Equipos de rotura para compresión y flexotracción

Tabla 17. Características de la prensa para ensayos de flexotracción

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA PRENSA MEM-101/10 M4	
Capacidad (Rango)	100 KN
Sentido de la fuerza	TRACC/COMP.
Variables de control	Fuerza y desplazamiento
Carrera	400 mm
Luz entre platos de compresión	>500 mm
Luz entre columnas	410 mm
Calibre de las columnas	60 mm
Velocidad máxima en control por recorrido	200 mm/min
Velocidad mínima en control por recorrido	0,1 mm/min
Velocidad máxima en control por fuerza	1000 DaN/s
Velocidad mínima en control por fuerza	0,1 DaN/s
Resolución de la medida de fuerza	1 DaN/s
Resolución de la medida de recorrido	0,01 mm
Resolución de la velocidad en control por recorrido	0,01 mm/min
Resolución de la velocidad en control por fuerza	0,1 DaN/s
Aceleración máxima	10 <sup>-3</sup> m/s
Clase de precisión de la medida de fuerza	0,50%
Clase de precisión de la medida de recorrido	0,50%
Estabilidad de la medida en función del tiempo	<0,5%/mes
Estabilidad de la medida en función de la temperatura	<0,01 %/°C
Sistema de medida de fuerza	Célula de carga
Dimensiones	1900x1500x500 mm
Peso aproximado	440 kg
Alimentación	220 V (2 fases) 380 V trifásica
Potencia máxima	0,5KW

Los ficheros de salida cuando se realiza la rotura contienen los siguientes datos:

- Tiempo en segundos
- Fuerza en kN
- Desplazamiento en mm



Figura 15. Detalle pantalla del programa para rotura de las probetas cilíndricas

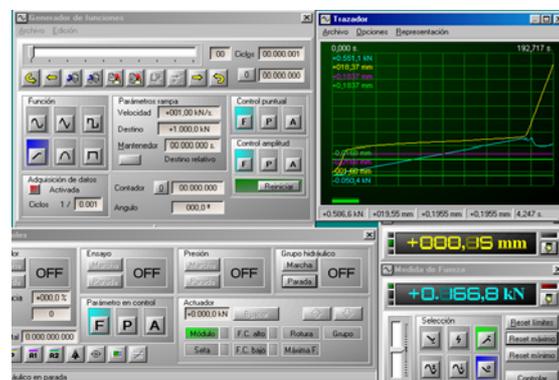


Figura 16. Detalle pantalla del programa para rotura a compresión

Para realizar los ensayos de fatiga se ha empleado una prensa dinámica MTS con estructura en pórtico que se ha montado sobre una plataforma rígida para estos ensayos.

Las características de la prensa son:

Tabla 18. Características de la prensa para ensayos de fatiga

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA PRENSA DINÁMICA MTS	
Actuador MTS 244.21 con LVDT interno	Ratio de fuerza = 50 KN
	Desplazamiento = 150-250 mm
	Recorrido máximo actuador = 777 a 1031 mm
	Servoválvula presión y retorno = 252.2x (qt y 1)
Célula de carga 661 Axial load Cells 661.20E-02	Capacidad = 50 KN
	Diámetro = 61,25 mm
	Rango temperaturas trabajo = -54°C a +93°C
	Resistencia = 350 Ω
	Repetibilidad = 0,03% escala total
	Deflexión en fuerza nominal = 0,05 mm
Control Flextest GT	
Central hidráulica 5054-60 180 base	
Pórtico de reacción fabricado en el laboratorio de la Universidad	Ancho = 1,75 m
	Fondo = 1,00 m
	Alto = 3,50 m



Foto 64. Prensa dinámica empleada en los ensayos de fatiga

#### 4.2.11. Equipos complementarios

Además de los equipos citados, se dispuso de los siguientes aparatos:

- 1 juego de dispositivos de aplicación de cargas para ensayos de tracción indirecta (ensayo brasileño).
- 1 dispositivo para determinación del módulo de elasticidad en compresión.

- varios transductores de desplazamientos para medición de deformaciones en ensayos de flexotracción.
- 2 equipos para registro de datos (deformaciones) durante la realización de los ensayos estáticos y dinámicos.
- equipo necesario para la determinación de la plasticidad del material (límites de Atterberg), el contenido de materia orgánica y sales.
- equipos auxiliares (espátulas, cronómetros, balanzas, martillos, etc).

### **4.3. METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO**

#### **4.3.1. Metodología**

El estudio se realiza con el material del reciclado obtenido a partir de un firme con 2/3 de material granular (20 cm de espesor) y un 1/3 de material bituminoso (10 cm de espesor), que se considera un caso común en los datos obtenidos de muchas obras, por lo que los resultados pueden generalizarse.

El contenido de cemento tipo ESP VI-1 32,5 N se ajusta al 3,5% para obtener una resistencia a compresión a 7 días de 2,5 MPa (valor mínimo exigido en el Pliego PG-4 del Ministerio de Fomento<sup>(6)</sup> y en las Recomendaciones de Proyecto y Construcción de Firmes y Pavimentos de la Junta de Castilla y León<sup>(7)</sup>), aunque para este tipo de cemento especial la resistencia se puede reducir en un 15%. Este ha sido el porcentaje de cemento obtenido en los ensayos previos de la obra (reciclado de la carretera SA-801) y que posteriormente se ha utilizado, obteniéndose una resistencia media en obra de 2,91 MPa a 7 días.

Para ello, previamente se caracteriza la mezcla (ensayos granulométricos, límites de Atterberg, materia orgánica y contenido de sulfatos) y se realiza un ensayo Proctor modificado con dicha dosificación de cemento, corroborando los datos obtenidos en la obra.

El modelo empleado en esta investigación consiste en la elaboración de un conjunto de probetas cilíndricas (Ø15,24 x 17,78 cm) que son ensayadas a compresión simple y tracción indirecta a las edades de 7, 28 y 90 días, y otro conjunto de probetas prismáticas (15 x 15 x 60 cm), algunas de las cuales se ensayan a flexotracción a las mismas edades y otras a fatiga a una edad superior a 90 días. En ambos casos, las dos mitades se rompen posteriormente a compresión simple y a tracción indirecta.

El amasado del material se realiza con la amasadora de eje vertical. Las probetas cilíndricas se fabrican con la ayuda del Martillo vibrante Kango, compactándolas al 98% de la densidad máxima Proctor modificado.

Las probetas prismáticas se fabrican con un dispositivo de vibrocompresión consistente en una mesa vibrante y un sobrepeso que pueda reposar libremente sobre la masa del material de la probeta durante su vibración. Se compactan, o al menos así se intenta, al 98% de la densidad máxima Proctor modificado.

Ambos tipos de probetas se introducen en la cámara húmeda a 20 ° C y 95% de humedad. Las probetas son desmoldadas al día siguiente con la particularidad de que las prismáticas son desmoldadas sin quitar la base para prevenir posibles roturas, y vueltas a meter en la cámara durante 5 días, tras los cuales son retiradas las bases.



Fotos 65 y 66. Pesaje de probeta prismática tras su fabricación y a los 5 días de curado apoyada en la base del molde

Las probetas permanecen en la cámara de curado el tiempo estimado y son sacadas al exterior unas horas antes de su rotura para eliminar la humedad superficial.

A partir de aquí, el trabajo de investigación tiene dos etapas en la que se realizan los mismos ensayos con el fin de perfeccionar los resultados obtenidos en la primera etapa con más datos. Así, para este contenido de cemento y con la humedad óptima obtenida en el ensayo Proctor modificado se confeccionan:

### **1ª etapa (años 2007 y 2008):**

- Cincuenta y una (51) probetas cilíndricas:
  - Seis (6) para determinar la dosificación de trabajo en los ensayos previos.
  - Nueve (9) para determinar el protocolo de fabricación de las probetas (tiempo y frecuencia de vibración)
  - Diecisiete (17) para ensayos a compresión (6 a 7 días, 3 a 28 y 8 a 90)
  - Diez (10) para ensayos a tracción indirecta (2 a 7 días, 2 a 28 y 6 a 90)
  - Nueve (9) para ensayos de determinación del módulo elástico (a más de 90 días)

- Cincuenta y ocho (58) probetas prismáticas :
    - Catorce (14) para determinar el protocolo de fabricación de las probetas (sobrepeso y tiempo de compactación). Dos de ellas, fabricadas con la densidad apropiada, se rompen posteriormente a fatiga.
    - Veintidós (22) para ensayos estáticos: 6 probetas se rompen a flexotracción a la edad de 7, 28 y 90 días y otras 4 probetas a más de un año (435 días). Una vez rotas los medios prismas resultantes se ensayan a tracción indirecta y a compresión.
    - Veintidós (22) para ensayos dinámicos de fatiga, divididas en 3 grupos a cada uno de los cuales se aplica una ley sinusoidal de cargas oscilando entre los siguientes valores:
      - 1<sup>er</sup> grupo (5 probetas): carga máxima y mínima = 50% y 25% de la tensión de rotura respectivamente
      - 2<sup>o</sup> grupo (7 probetas): carga máxima y mínima = 65% y 30% de la tensión de rotura
      - 3<sup>o</sup> grupo (10 probetas): carga máxima y mínima = 80% y 40% de la tensión de rotura
- Una vez ensayadas a fatiga las probetas, se obtienen la resistencia a tracción indirecta y a compresión de los medios prismas resultantes.

## **2ª etapa (años 2009 y 2010):**

- Nueve (9) probetas cilíndricas:
  - Nueve (9) para determinación del módulo elástico (3 a 7 días, 1 a 235 días y 5 a más de 1 año)
- Cuarenta y ocho (48) probetas prismáticas :
  - Quince (15) para ensayos estáticos que se rompen a flexotracción a diferentes edades (de 80 a 180 días) para corroborar los valores de resistencia a flexotracción estimados. Una vez rotas los medios prismas resultantes se ensayan a tracción indirecta y a compresión.
  - Treinta y tres (33) para ensayos de fatiga, divididas en 3 grupos a cada uno de los cuales se aplica una ley sinusoidal de cargas oscilando entre los siguientes valores:
    - 1<sup>er</sup> grupo (2 probetas): carga máxima y mínima = 50% y 25% de la tensión de rotura
    - 2<sup>o</sup> grupo (9 probetas): carga máxima y mínima = 65% y 30% de la tensión de rotura
    - 3<sup>o</sup> grupo (22 probetas): carga máxima y mínima = 80% y 40% de la tensión de rotura

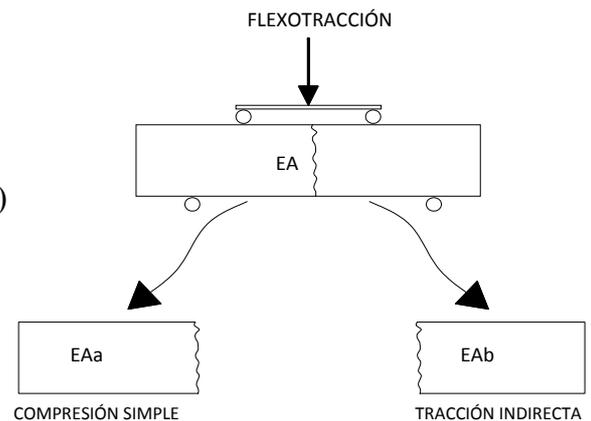
Una vez ensayadas a fatiga las probetas, se obtienen la resistencia a tracción indirecta y a compresión de los medios prismas resultantes

Para la identificación de las probetas se ha empleado la siguiente denominación:

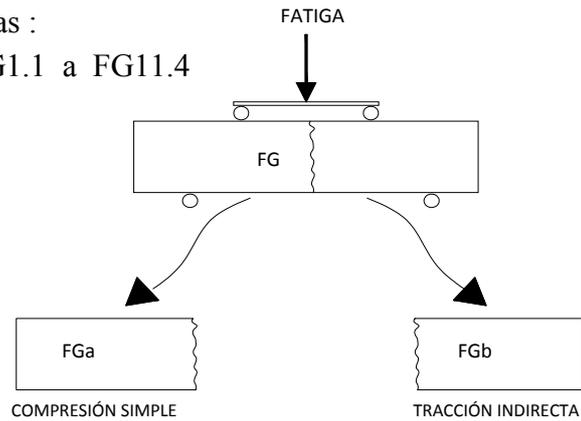
- Ensayos estáticos en probetas cilíndricas:
  - Denominación de las probetas:
    - P1.1 a P2.3 para estudios previos dosificación (6 probetas)
    - C1 a C9 para definir protocolo de fabricación (9 probetas)
    - A1.1 a A3.9 para compresión y tracción indirecta (27 probetas)
    - M4.1 a M5.9 para ensayos de módulo elástico (18 probetas)
  - Número de probetas: 60 (51 en la 1ª etapa y 9 en la 2ª etapa)
  - Dimensiones: 15,24 cm x 17,78 cm
  - Ensayos realizados:
    - Compresión simple
    - Tracción indirecta
    - Módulo elástico
  
- Ensayos estáticos en probetas prismáticas:
  - Denominación de las probetas:
    - AP1.1 a AP7.2 para definir protocolo de fabricación (14 probetas)
    - EA1.1 a EA9.2 para ensayar a flexotracción (18 probetas)
    - Algunas de las FG confeccionadas para ensayar a fatiga se rompen a flexotracción (19 probetas)
  - Número de probetas: 51
  - Dimensiones: 60 x 15 x 15 cm.
  - Ensayos realizados:
    - Flexotracción (probetas EA y FG)
    - Compresión simple (mitades EAa)
    - Tracción indirecta (mitades EAb)

El objetivo de estos ensayos estáticos es:

- 1.- Obtener los valores de R. a Flexotracción
- 2.- Relacionar la resistencia a flexotracción con la tracción indirecta y la compresión simple.



- Ensayos dinámicos en probetas prismáticas :
  - Denominación de las probetas: FG1.1 a FG11.4
  - Número de probetas: 55
  - Dimensiones: 60 x 15 x 15 cm.
  - Ensayos realizados:
    - Flexotracción
    - Compresión simple
    - Tracción Indirecta



El objetivo de estos ensayos dinámicos es:

- 1.- Obtener el número de ciclos de rotura (N)
- 2.- Obtener la relación  $\sigma / R_F$  para definir la ley de fatiga.
- 3.- Obtener los valores de resistencia a flexotracción y de tensión de rotura ( $\sigma$ )

Así pues el número de probetas fabricadas de cada tipo y el número de ensayos realizados es:

Tabla 19. Número y tipo de probetas fabricadas

Nº PROBETAS CILÍNDRICAS					
Denominación	Pruebas dosificación	Compresión	Tracción indirecta	Módulo	TOTAL
1ª FASE (2007 - 2008)	P	6			6
	C	9			9
	A1.x		6	3	9
	A2.x		6	3	9
	A3.x		5	4	9
	M4.x				9
2ª FASE (2009-2010)	M5.x			9	9
SUMA	15	17	10	18	60

Nº PROBETAS PRISMÁTICAS					
Denominación	Pruebas dosificación	Ensayo flexotracción	Ensayo Fatiga	TOTAL	
1ª FASE (2007-2008)	AP	14		14	
	EA		18	18	
	FG1.x			6	6
	FG2.x			6	6
	FG3.x			6	6
	FG4.x		3	3	6
	FG5.x		1	1	2
2ª FASE (2009-2010)	FG6.x		7	11	18
	FG7.x		1	3	4
	FG8.x		1	5	6
	FG9.x		2	8	10
	FG10.x		3	3	6
	FG11.x		1	3	4
SUMA	14	37	55	106	

Tabla 20. Número de ensayos realizados

Ensayo Probeta	Pruebas Dosificación	Flexotracción	Fatiga	Compresión	Tracción indirecta	Módulo	TOTAL
Prismáticas	14	37	55	92	92		290
Cilíndricas	15			17	10	18	60
SUMA	29	37	55	109	102	18	350

Para disponer de un orden de magnitud de la importancia de los ensayos realizados durante estos tres años se ha realizado una valoración económica de los trabajos de acuerdo con los precios públicos que rigen en las prestaciones de servicios del CEDEX según Resolución de 22 de octubre de 2009<sup>(61)</sup>:

Ensayo	Unidades	€/ud	Suma
Estudio de dosificación .....	2	140,00	280,00 €
Ensayo Proctor modificado .....	1	104,24	104,24 €
Dosificación y fabricación probetas cilíndricas .....	60	32,13	1.927,80 €
Dosificación y fabricación probetas prismáticas .....	106	47,20	5.003,20 €
Refrentado de probetas .....	60	5,04	302,40 €
Resistencia a compresión simple .....	109	18,56	2.023,04 €
Resistencia a tracción indirecta .....	102	36,39	3.711,78 €
Resistencia a flexotracción .....	37	34,75	1.285,75 €
Resistencia a fatiga .....	55	106,40	5.852,00 €
Resistencia a compresión con medida de deformaciones (módulo) .....	18	39,36	708,48 €
Tomografía axial .....	2	246,67	493,34 €
		TOTAL ...	21.692,03 €
		Gastos generales 22% ...	4.772,25 €
		IVA 18% ...	4.763,57 €
		TOTAL ...	31.227,85 €

A esta cifra habría que sumar muchos otros conceptos de costes fijos de equipos de laboratorio (luz, balanzas, cámara de curado, espacio ocupado, etc), otros conceptos difíciles de valorar como el tener ocupada la prensa dinámica durante meses sin permitir su empleo al resto de departamentos y sobre todo el personal que realiza y analiza los ensayos y sus resultados, que es difícil estimar y que incrementaría considerablemente el 22% considerado de gastos generales, además del esfuerzo e ilusión de un conjunto de personas durante 3 años completos.

#### 4.3.2. Planificación temporal y calendario

Aunque inicialmente el programa era menos ambicioso y se pretendía ensayar en un año y medio, el mayor número de probetas que se pudieran fabricar, la limitada disponibilidad de espacio en la cámara de curado y el tener que compartir en ocasiones las prensas, alargó el plazo de los trabajos hasta los 3 años.

Como anecdotario cabe citar que coincidiendo en el tiempo se estropearon a la vez las prensas de ensayo dinámico a fatiga y la de rotura a tracción indirecta y compresión. Si la primera se pudo arreglar en un tiempo prudencial, la otra prensa hubo que desmontarla y enviar la placa base a Madrid, lo que impidió la rotura inmediata de los medios prismas obtenidos de las probetas prismáticas. Esta situación sumada a que lógicamente no se ha tenido libre disponibilidad de las prensas durante los 3 años de ensayos, hace que los ensayos de resistencia a compresión y a tracción indirecta de las dos mitades de cada probeta prismática no estén siempre realizados en los días siguientes a los de la rotura de dicha probeta prismática, o bien que las roturas a fatiga de algunas de estas probetas no se hayan obtenido en fechas concretas con una edad exacta, alargándose en el tiempo en algunos casos.

En el caso concreto de la probeta 11.6 se ensayó a fatiga durante toda una semana completa sin que apareciera ninguna fisura, por lo que ante la necesidad de mover la prensa para realizar otros ensayos en el laboratorio, se retiró sin romper de la prensa de fatiga y se ensayó a flexotracción posteriormente.

A continuación se detalla la planificación temporal de ensayos que se ha seguido y el calendario por semanas de los ensayos realizados durante estos tres años que han durado los trabajos.

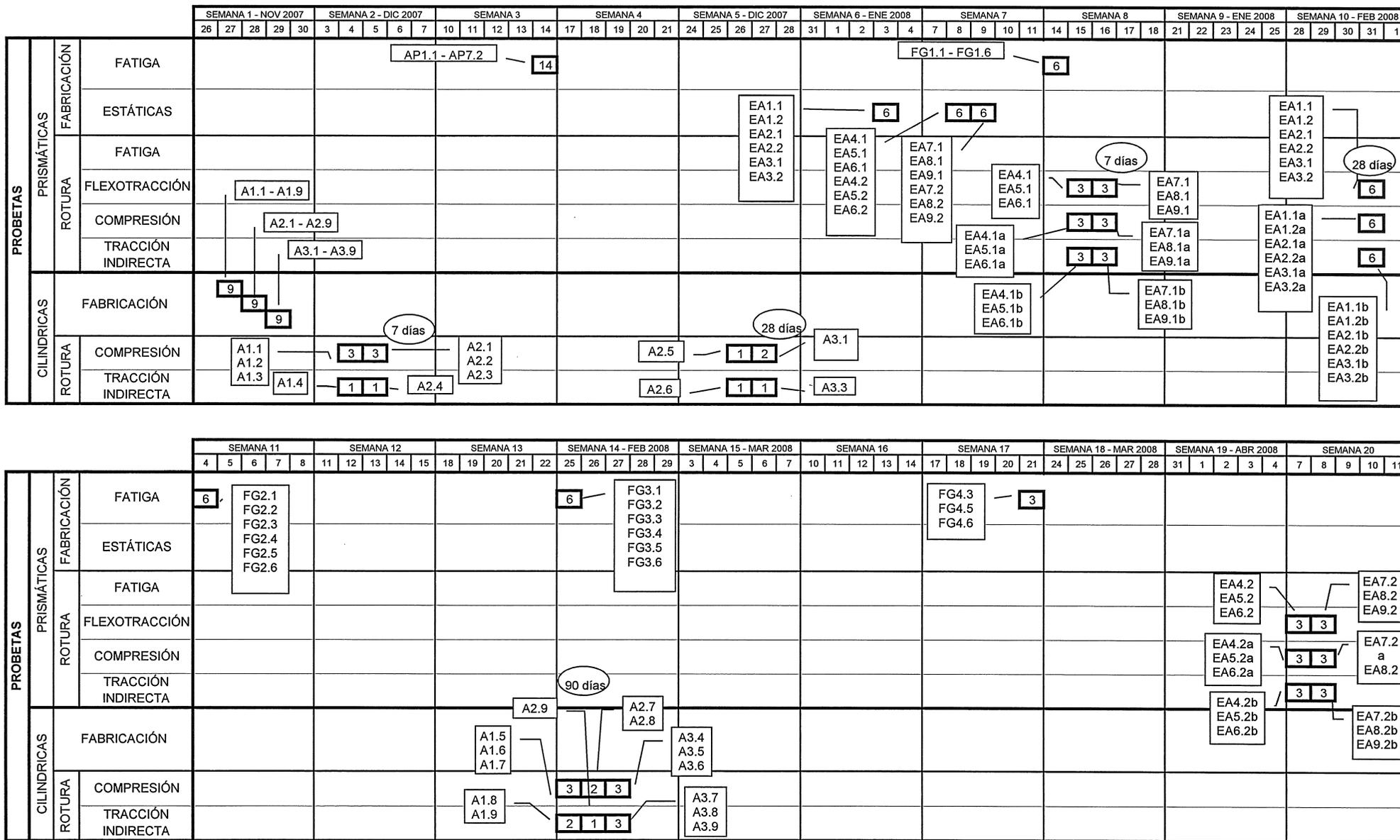


Figura 17. Calendario de ensayos

		SEMANA 21					SEMANA 22					SEMANA 23 - ABR 2008					SEMANA 24 - MAYO 2008					SEMANA 25					SEMANA 26					SEMANA 27 - MAYO 2008					SEMANA 28 - JUN 2008					SEMANA 29					SEMANA 30				
		14	15	16	17	18	21	22	23	24	25	28	29	30	1	2	5	6	7	8	9	12	13	14	15	16	19	20	21	22	23	26	27	28	29	30	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	16	17	18	19	20
PROBETAS	PRISMÁTICAS	FABRICACIÓN	FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		FLEXOTRACCIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FABRICACIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		FLEXOTRACCIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FABRICACIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA														
		ROTURA	FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		FLEXOTRACCIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FABRICACIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FABRICACIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		FLEXOTRACCIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA														
			FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		FLEXOTRACCIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FABRICACIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FABRICACIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		FLEXOTRACCIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA														
			FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		FLEXOTRACCIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FABRICACIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FABRICACIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		FLEXOTRACCIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA														
		FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		FLEXOTRACCIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FABRICACIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FABRICACIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		FLEXOTRACCIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA															
	FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		FLEXOTRACCIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FABRICACIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FABRICACIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		FLEXOTRACCIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA																

		SEMANA 31 - JUN 2008					SEMANA 32 - JUL 2008				SEMANA 33					SEMANA 34					SEMANA 35					SEMANA 36 - JUL 2008					SEMANA 37 - AGO 2008					SEMANA 38					SEMANA 39					SEMANA 40 - AGO 2008				
		23	24	25	26	27	30	1	2	3	4	7	8	9	10	11	14	15	16	17	18	21	22	23	24	25	28	29	30	31	1	4	5	6	7	8	11	12	13	14	15	18	19	20	21	22	25	26	27	28
PROBETAS	PRISMÁTICAS	FABRICACIÓN	FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		FLEXOTRACCIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FABRICACIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		ESTÁTICAS											
		ROTURA	FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		FLEXOTRACCIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FABRICACIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FABRICACIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		ESTÁTICAS													
			FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		FLEXOTRACCIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FABRICACIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FABRICACIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		ESTÁTICAS													
			FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		FLEXOTRACCIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FABRICACIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FABRICACIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		ESTÁTICAS													
		FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		FLEXOTRACCIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FABRICACIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FABRICACIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		ESTÁTICAS														
	FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		FLEXOTRACCIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FABRICACIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FABRICACIÓN		COMPRESIÓN		TRACCIÓN INDIRECTA		FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		ESTÁTICAS		FATIGA		ESTÁTICAS															

Figura 17. Calendario de ensayos



		SEMANA 61					SEMANA 62 - ENE 2009					SEMANA 63 - FEB 2009					SEMANA 64					SEMANA 65					SEMANA 66 - FEB 2009					SEMANA 67 - MAR 2009					SEMANA 68					SEMANA 69					SEMANA 70 - MAR 2009				
		19	20	21	22	23	26	27	28	29	30	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	16	17	18	19	20	23	24	25	26	27	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	16	17	18	19	20	23	24	25	26	27
PROBETAS	PRISMÁTICAS	FABRICACIÓN	FATIGA																																																
			ESTÁTICAS																																																
		ROTURA	FATIGA																																																
			FLEXOTRACCIÓN																																																
			COMPRESIÓN																																																
		TRACCIÓN INDIRECTA																																																	
	CILINDRICAS	FABRICACIÓN	FATIGA																																																
			ESTÁTICAS																																																
		ROTURA	COMPRESIÓN																																																
			TRACCIÓN INDIRECTA																																																

FG3.1a  
FG3.2a  
FG3.3a  
FG3.4a     4

FG3.1b  
FG3.2b  
FG3.3b  
FG3.4b     4

		SEMANA 71 - ABR 2009					SEMANA 72					SEMANA 73					SEMANA 74					SEMANA 75 - ABR 2009					SEMANA 76 - MAY 2009					SEMANA 77					SEMANA 78					SEMANA 79 - MAY 2009					SEMANA 80 - JUN 2009				
		30	31	1	2	3	6	7	8	9	10	13	14	15	16	17	20	21	22	23	24	27	28	29	30	1	4	5	6	7	8	11	12	13	14	15	18	19	20	21	22	25	26	27	28	29	1	2	3	4	5
PROBETAS	PRISMÁTICAS	FABRICACIÓN	FATIGA																																																
			ESTÁTICAS																																																
		ROTURA	FATIGA																																																
			FLEXOTRACCIÓN																																																
			COMPRESIÓN																																																
		TRACCIÓN INDIRECTA																																																	
	CILINDRICAS	FABRICACIÓN	FATIGA																																																
			ESTÁTICAS																																																
		ROTURA	COMPRESIÓN																																																
			TRACCIÓN INDIRECTA																																																

1 — FG3.5a

1 — FG3.5b

Figura 17. Calendario de ensayos

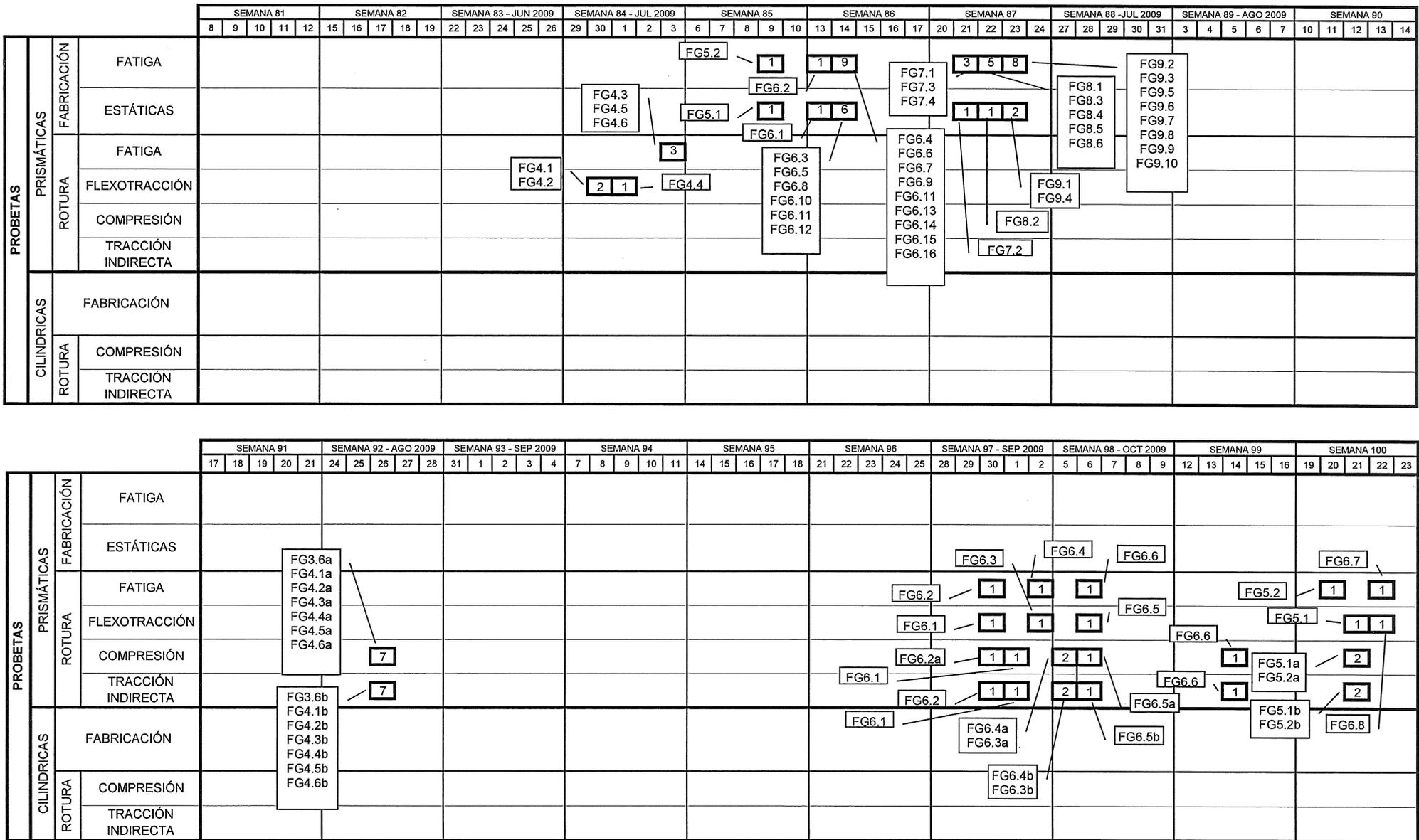


Figura 17. Calendario de ensayos



		SEMANA 121					SEMANA 122					SEMANA 123 - MAR 2010					SEMANA 124 - ABR 2010					SEMANA 125					SEMANA 126					SEMANA 127 - ABR 2010					SEMANA 128 - MAY 2010					SEMANA 129					SEMANA 130				
		15	16	17	18	19	22	23	24	25	26	29	30	31	1	2	5	6	7	8	9	12	13	14	15	16	19	20	21	22	23	26	27	28	29	30	3	4	5	6	7	10	11	12	13	14	17	18	19	20	21
PROBETAS	PRISMÁTICAS	FABRICACIÓN																																																	
		FATIGA																																																	
		ESTÁTICAS																																																	
		FATIGA																																																	
		FLEXOTRACCIÓN													1	FG10.								1	FG10.									2	FG11.3									FG11.2							
	COMPRESIÓN													1									1										1	FG10.6									FG11.1								
	TRACCIÓN INDIRECTA																																																		
	CILINDRICAS	FABRICACIÓN																																																	
		COMPRESIÓN																																																	
		TRACCIÓN INDIRECTA																																																	

		SEMANA 131 - MAY 2010					SEMANA 132 - JUN 2010					SEMANA 133					SEMANA 134					SEMANA 135					SEMANA 136 - JUN 2010				
		24	25	26	27	28	31	1	2	3	4	7	8	9	10	11	14	15	16	17	18	21	22	23	24	25	28	29	30		
PROBETAS	PRISMÁTICAS	FABRICACIÓN																													
		FATIGA																													
		ESTÁTICAS																													
		FATIGA																													
		FLEXOTRACCIÓN	FG10.1a FG10.4a FG10.6a FG11.1a FG11.2a										FG11.3a										FG11.4a								
	COMPRESIÓN						5										1					1									
	TRACCIÓN INDIRECTA						5										1					1									
	CILINDRICAS	FABRICACIÓN	FG10.1b FG10.4b FG10.6b FG11.1b FG11.2b										FG11.3b										FG11.4b								
		COMPRESIÓN																													
		TRACCIÓN INDIRECTA																													

Figura 17. Calendario de ensayos



---

## **CAPÍTULO 5**



## **DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS REALIZADOS**



## 5. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

Partiendo del estudio de dosificación realizado en la obra y corroborado en el laboratorio, se establece para la dosificación elegida, el procedimiento de realización de las probetas cilíndricas y prismáticas para obtener la densidad requerida. También se incluye los parámetros que definen cada uno de los ensayos de rotura a compresión, tracción indirecta o flexotracción.

### 5.1. DOSIFICACIÓN DEL MATERIAL RECICLADO

Para determinar la dosificación del material reciclado se partió de los datos disponibles de la obra realizándose algunos ensayos como comprobación:

- Proctor modificado

Los resultados correspondientes al ensayo Proctor modificado del suelo mezclado con diferentes porcentajes de cemento según norma UNE 103501<sup>(21)</sup> realizados en obra son:

Tabla nº 21. Ensayos Proctor modificado del material

DOSIFICACIÓN CEMENTO	3,5 %	4,0 %
Densidad máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	2,17	2,10
Humedad óptima	6,1 %	7,4 %

Estos datos se corroboran el día 15/11/2007 en el laboratorio de transportes de la Escuela Politécnica de Burgos realizando un nuevo ensayo Proctor modificado con el 4% de cemento según norma UNE 103501<sup>(21)</sup>, utilizando un molde cilíndrico de 15,24 cm de diámetro y 12,70 cm de altura, con un volumen de 2318 cm<sup>3</sup>. No se comprobó el valor de densidad máxima Proctor modificado del material dosificado con un 3,5% de cemento, que parece demasiado alto como posteriormente se puso de manifiesto.

Para ello se secan en estufa 45 Kg de material fresado durante 24 h, por lo que el material disponible para el ensayo puede considerarse completamente seco. El ensayo comienza con el tamizado de la muestra por la malla de 20 mm. El material bituminoso de tamaño superior se disgrega hasta reducir su tamaño por debajo de 20 mm.



Foto 67. Estufa de secado



Foto 68. Muestra del material y tamiz

Se ensayan cinco muestras de 6 kg de material reciclado con un 4% de cemento y contenidos de agua diferentes. Una vez que se ha realizado la mezcla, se procede a la realización del ensayo como indica la norma UNE 103501<sup>(21)</sup> (5 tongadas por molde y 60 golpes por tongada). Los resultados del ensayo se incluyen en el anejo 2, tabla A2.6.

La densidad seca máxima con el 4% de cemento resulta ser 2,10 g/cm<sup>3</sup> y la humedad óptima de compactación 7,61%.

- Dosificación

El estudio de dosificación realizado antes de iniciar la obra por el laboratorio de PAS, consideraba como dosificación óptima un 3,7% de cemento con un 6,1% de humedad óptima, de acuerdo con los ensayos siguientes en los que se exigía una resistencia de 2,1 MPa a 7 días por emplearse cemento con alto contenido de adiciones:

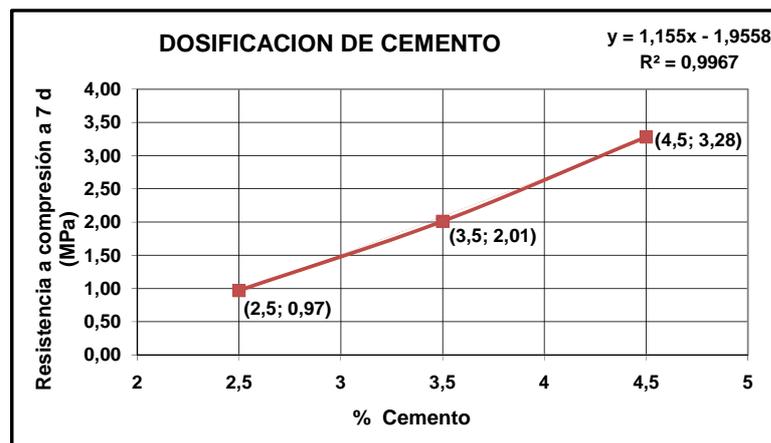


Figura 18. Estimación del % de cemento necesario para la 1ª serie

Así, se inició la obra con una dotación del 4% de cemento, que a partir del pk 13,500 (el reciclado avanzaba en sentido inverso de pk) se redujo al 3,5% debido a las altas resistencias obtenidas. Los resultados medios de obra son (resultados con 14 series de 3 probetas incluidos en tablas A2.2 a A2.5 del anejo 2):

Tabla 22. Resultados de obra. Reciclado SA-801

Tramo	% cemento	Humedad óptima	Densidad máxima	Resistencia media	
				3 días	7 días
Pk 13+500 a 15+500	4%	7,4	2,10	2,30	3,026
Pk 0+000 a 13+500	3,5%	6,1	2,17	2,36	2,913

Considerando la mayor resistencia obtenida en obra, y con el objetivo de comprobar estos datos se fabricaron en el laboratorio probetas cilíndricas de Ø 15,24 x 17,78 cm (3.243,33 cm<sup>3</sup>) con un 3 y 3,5 % de cemento y un 7,61% de humedad añadida. Los resultados obtenidos se incluyen en la siguiente tabla, obteniéndose 2,071 MPa de resistencia a compresión a 7 días con un 3% de cemento, y 2,637 con el 3,5% de cemento, por lo que se adoptó esta misma dosificación que en obra (datos incluidos en la tabla A2.7 del anejo 2).

Tabla n° 23. Resultados de ensayos previos de dosificación del estudio en el laboratorio de Burgos

Probeta n°	% de cemento	Peso suelo + agua	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	% Densidad Proctor	Peso a los 7 días (g)	Tensión de rotura (MPa)	Tensión media (MPa)
P1.1	3	7363	2,151	102,433	7261	1,757	2,071
P1.2		7215	2,108	100,374	7115	1,465	
P1.3		7262	2,122	101,028	7162	2,991	
P2.1	3,5	7087	2,070	98,593	6989	2,259	2,637
P2.2		7337	2,143	102,071	7236	2,560	
P2.3		7361	2,151	102,405	7259	3,092	

Se decide fabricar las probetas con una dotación del 3,5% de cemento ESP VI-1 32,5 N como se ha realizado en la obra y un 7,61% de humedad, que es la óptima obtenida en el ensayo Proctor modificado realizado en el laboratorio, que aunque resulta algo superior a la definida en la obra, permite estar del lado de la seguridad al obtenerse en este caso resistencias ligeramente inferiores.

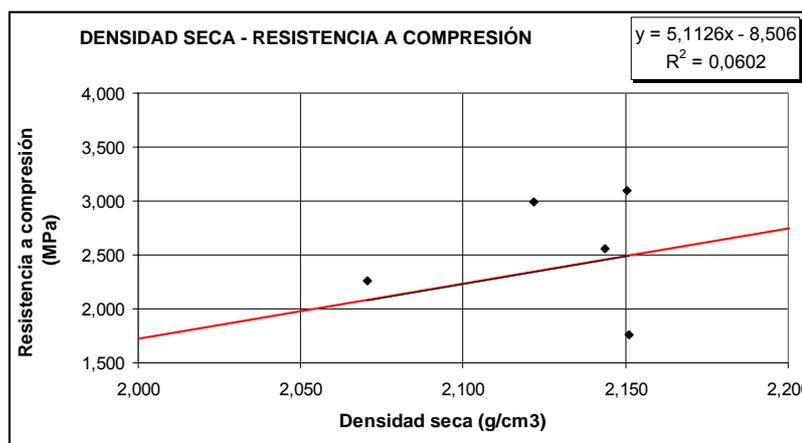


Figura 19. Relación entre resistencia a compresión y densidad en los estudios de dosificación de la tesis

La gráfica resistencia a compresión-densidad seca no permite ninguna conclusión dado el escaso número de datos y la diferente dosificación empleada de cemento ESP VI-1 en la obtención de los mismos.

## 5.2. FABRICACIÓN DE PROBETAS

### 5.2.1. Ensayos previos para la fabricación de probetas cilíndricas

Los primeros ensayos que se realizan en el laboratorio de Grandes Estructuras de la E.P.S. de Burgos tienen por objeto determinar el tiempo y la frecuencia de vibración para compactar cada una de las 3 capas con las que se fabrica cada probeta para obtener una densidad de  $2,10 \text{ g/cm}^3$ . Este valor corresponde a la máxima densidad obtenida en el ensayo Proctor realizado en el laboratorio de la Escuela y coincide con el de obra realizado con el 4% de cemento. Resultan además igual al 97% de la máxima densidad Proctor modificado obtenida en la obra con el 3,5% de cemento.

Para ello, según los datos incluidos en la tabla A2.8 del anejo 2 que se representan en el gráfico siguiente, se fabrican 3 series de probetas. Cada serie se compacta con una frecuencia diferente abarcando la mínima, media y máxima que proporciona el martillo Kango (posiciones A, D y G respectivamente). A su vez cada probeta de la serie se compacta durante un tiempo diferente de 5, 10 y 15 s.

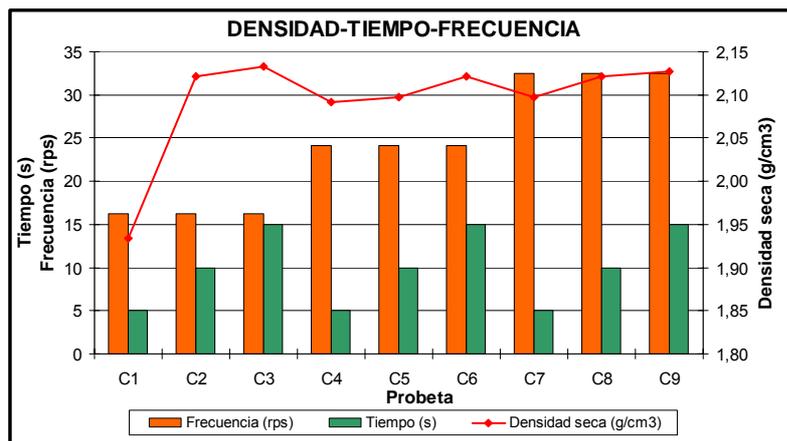


Figura 20. Relación densidad, tiempo de actuación y frecuencia del martillo kango

A la vista de los resultados se decidió realizar las probetas cilíndricas con la máxima frecuencia (1950 rpm) y con un tiempo de compactación por capa de 15 s. El motivo es asegurar una densidad de  $2,10 \text{ g/cm}^3$  o superior y cumplir con las especificaciones de la norma NLT-310/90<sup>(60)</sup>, compactación con martillo vibrante de materiales granulares tratados, que limita la frecuencia de vibración entre 1600 y 2000 rpm.

### 5.2.2. Ensayos previos para la fabricación de probetas prismáticas

Para determinar un método de compactación de las probetas prismáticas mediante vibración y peso, no se encontraron dispositivos comerciales. La información recogida apunta a una desaparecida mesa de vibro-compactación propiedad del Instituto Eduardo Torroja y otra localizada en la Escuela Técnica Superior de la Universidad de Sevilla fabricada por

encargo. En este caso se aprovecha la mesa vibrante existente en el laboratorio de Grandes Estructuras de la Universidad de Burgos. Sobre dicha mesa se coloca el molde prismático sujeto mediante 4 mordazas y unos topes o rigidizadores metálicos que impiden el movimiento de las mordazas durante la vibración. Además se usa un molde a modo de collarín colocado sobre el de la probeta, sujetándose ambos mediante cuatro varillas roscadas de Ø 10 mm, atornilladas con sus correspondientes palomillas a la base del molde y a los orificios dispuestos en el collarín.



Foto 69. Planta de la mesa vibrante



Foto 70. Dispositivo de vibro-compactación

Para definir el contrapeso se ha ideado una serie de pesas montadas sobre dos varillas roscadas que permiten variar el peso acoplando o quitando chapas. Las figuras siguientes ilustran el aparato.



Foto 71. Conjunto de pesas



Foto 72. Pesas acopladas en el molde

La pesa que actúa como soporte tiene un peso de 13,45 kg y las varillas roscadas y las tuercas pesan 2,35 kg, lo que suma 15,80 kg. Este peso se puede ir incrementando en 6,10 kg con cada una de las 6 pesas disponibles hasta un total de 52,40 kg.

Con el fin de determinar el tiempo de compactación por capa y el peso a añadir para lograr fabricar las probetas prismáticas con la densidad exigida de  $2,10 \text{ g/cm}^3$ , se fue probando con diferentes tiempos de compactación (5, 15 y 20 s) y diferentes pesos (15,80 – 21,90 – 34,10 y 46,30 Kg) obteniendo los resultados que se muestran en la tabla A2.9 del anejo 2 y que resumidamente son:

Tabla 24. Densidades obtenidas con diferentes contrapesos ordenadas por tiempo de vibrocompactación

Probeta nº	Tiempo compactación (s)	Peso compactación (Kg)	Densidad seca $ds=s/v$ (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad media (g/cm <sup>3</sup> )
AP6.1	5	21,90	2,042	2,029
AP6.2	5	21,90	2,016	
AP5.2	15	21,90	2,109	2,103
AP5.1	15	15,80	2,083	
AP1.1	15	46,30	2,102	
AP3.1	15	34,10	2,102	
AP4.1	15	34,10	2,117	
AP1.2	20	46,30	2,024	2,107
AP2.1	20	46,30	2,109	
AP2.2	20	46,30	2,097	
AP3.2	20	34,10	2,109	
AP4.2	20	34,10	2,112	

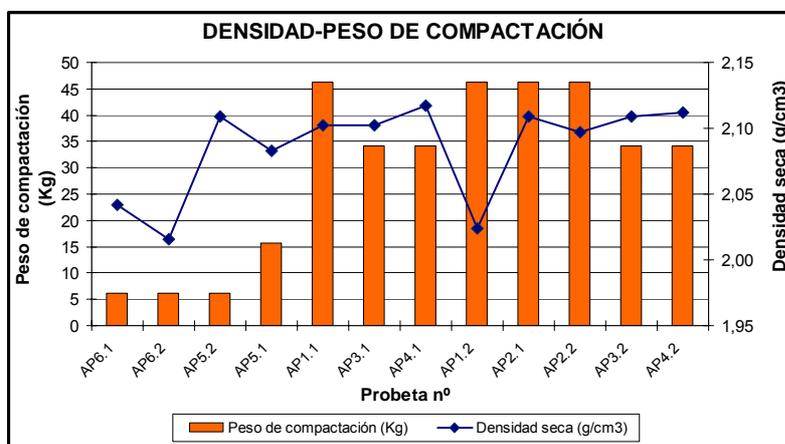


Figura 21. Relación densidad – peso de compactación. Ensayos previos

Agrupando las probetas por tiempos de compactación y considerando como variable el contrapeso se descarta la fabricación con 15,80 y 21,90 Kg de peso, ya que se obtienen densidades por debajo de lo necesario.

Tabla 25. Densidades obtenidas ordenadas según el peso de compactación

Probeta nº	Peso compactación (Kg)	Tiempo compactación (s)	Densidad seca $ds=s/v$ (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad media (g/cm <sup>3</sup> )
AP5.1	15,80	15	2,083	2,083
AP6.1	21,90	5	2,042	2,055
AP6.2	21,90	5	2,016	
AP5.2	21,90	15	2,109	
AP3.1	34,10	15	2,102	2,110
AP3.2	34,10	20	2,109	
AP4.1	34,10	15	2,117	
AP4.2	34,10	20	2,112	
AP1.1	46,30	15	2,102	2,103
AP1.2	46,30	20	2,024	
AP2.1	46,30	20	2,109	
AP2.2	46,30	20	2,097	

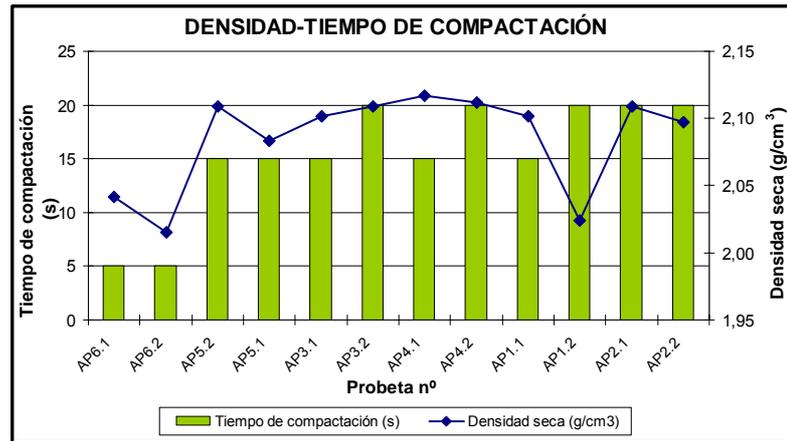


Figura 22. Relación densidad – tiempo de compactación. Ensayos previos

Agrupando las probetas por peso de compactación y como variable el tiempo se descarta la opción de compactar durante 5 s.

Durante la elaboración de las probetas, la probeta 1.2. presentó coqueas visibles en su contorno, por lo que su valor de densidad no se ha tenido en cuenta para el análisis. Por otro lado, la probeta 2.2. se rompió al ser desmoldada a las 24 h de su fabricación. A raíz de esta rotura se optó por modificar el procedimiento de desmoldeo para el resto de probetas: se siguió desmoldando a las 24 h de la fabricación, pero sin quitar la base del molde para no provocar esfuerzos de flexión en las probetas durante su manipulación a edades tan tempranas. Dicha base se retira a los 5 días.

Por último, se realiza un análisis teniendo en cuenta todas las variables para elegir el método de elaboración de las probetas prismáticas.

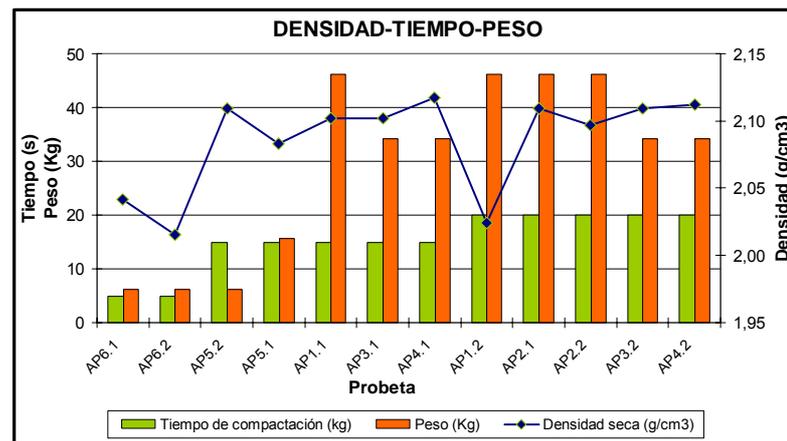


Figura 23. Relación densidad – tiempo de vibración – contrapeso. Ensayos previos

Observando el gráfico, se deduce que no existe diferencia significativa en los valores obtenidos de densidad compactando durante 15 ó 20 s. Por este motivo se prefirió compactar cada capa durante 15 s, considerando el esfuerzo que requiere puesto que el contrapeso se coloca y sujeta a mano.

En cuanto al peso a colocar sobre cada capa, usando 46,20 kg no hay evidencia de que se obtengan densidades mayores que con 34,10 kg. Por este motivo se eligió compactar cada capa con un peso de 34,10 kg, considerando que se coloca de forma manual al no existir guías.

### 5.2.3. Fabricación de probetas cilíndricas

La fabricación de las 27 probetas cilíndricas necesarias en la primera fase para la campaña de ensayos programada a compresión y a tracción indirecta, se realizaron en 3 días sucesivos, fabricando 9 probetas cada día, dado que solo se disponía de 18 moldes. Posteriormente en la segunda etapa se fueron fabricando en función de las disponibilidades

Cada serie de 9 probetas se fabrica con una única amasada de material fresado, cemento y agua. Para ello se seca previamente una cantidad suficiente de material durante 24 h en la estufa a 80°C.

Las cantidades de material usado en cada amasada se detallan a continuación.

Tabla 26. Peso de los componentes en cada amasada para fabricar probetas cilíndricas

Amasada	Material seco (Kg)	3,5 % Cemento (Kg)	7,61 % Agua (Kg)	Masa total (Kg)
1	84,11	2,943	6,625	93,679
2	80,48	2,816	6,339	89,636
3	83,9	2,936	6,608	93,445

Una vez que se dispone del material fresado seco, se comprueba que no contiene elementos mayores de 40 mm con la ayuda del tamiz correspondiente. Posteriormente, se pesa y se añade el 3,5 % en peso de cemento y se mezcla con la ayuda de la amasadora. Al material resultante se le añade el 7,61 % de agua en peso, repartiendo el agua de manera homogénea sobre la mezcla. Con todos los componentes de la mezcla en la amasadora, se procede a su amasado durante 5 min.



Foto 73. Dosificación de cemento



Foto 74. Dosificación de agua



Foto 75. Amasadora de eje vertical



Foto 76. Vertido del material mezclado sobre la carretilla

Tras el amasado, se procede al vertido del material resultante en la carretilla para comenzar a fabricar las probetas. Previamente se preparan 9 moldes y se les aplica desencofrante en su interior. Las probetas se realizan con 3 capas de material en cada molde y son compactadas una a una mediante el martillo Kango, hasta sobrepasar ligeramente la altura del molde con la ayuda del collarín que se dispone en la parte superior del mismo.



Foto 77. Martillo Kango y guías

Cada capa de material se compacta de acuerdo con la norma NLT-310 durante 15 s con el martillo Kango apoyado sobre dicha capa y con una frecuencia de 1950 rpm (posición G del martillo).

Tras estos pasos, se procede a la retirada del collarín y al enrasado del material sobrante hasta la altura del molde. Para ello se utilizan herramientas auxiliares como la enrasadora metálica y la llana. Para el acabado de la cara superior de cada probeta se usa un mortero fabricado con el material que pasa por el tamiz de 5 mm, agua y cemento, con el objeto de dejar la superficie libre lo más lisa posible.



Foto 78. Llana metálica



Foto 79. Tamiz de 5 mm de abertura

Tras la fabricación de las probetas, estas son introducidas en la cámara de curado (20°C y 95% de humedad), donde permanecen 24 horas, se desmoldan y se vuelven a introducir para continuar su curado en las mismas condiciones hasta la fecha de rotura.



Foto 80. Disposición en la cámara de curado de las probetas cilíndricas

Cada probeta se pesa con el molde nada más fabricarse (peso de molde conocido previamente), y cuando se desmolda antes de ensayar, con el fin de determinar la densidad de la probeta y referenciarla a la máxima Proctor modificado, y conocer la diferencia de peso que sufre la probeta en la cámara de curado. Todos los datos se incluyen en las tablas A2.10 y A2.11 del anejo 2.

#### **5.2.4. Fabricación de probetas prismáticas**

Para la realización de los primeros ensayos previstos en la 1ª etapa (ensayos estáticos de rotura a flexotracción) era necesario fabricar 18 probetas prismáticas (15 x 15 x 60 cm). Como se disponía de 6 moldes, se optó por fabricar las probetas en grupos de 6 cada día, ya que se pueden desmoldar pasadas 24 horas.



Foto 81. Molde, collarín, mesa vibrante y peso

Con cada amasada de material se fabrica el volumen necesario para 2 probetas ya que, aunque en la amasadora cabe material para 3 probetas, se tarda tiempo en fabricarlas y el material puede perder humedad y exceder el plazo de trabajabilidad. Por tanto se fabrican 6 probetas al día en 3 amasadas de material. La dosificación es la determinada anteriormente

(3,5 % de cemento y 7,61 % de humedad) y el proceso de amasado el ya definido. Para ello se seca previamente durante 24 h en la estufa a 80 °C una cantidad suficiente del material que estaba acopiado en el interior del laboratorio.



Fotos 82 y 83. Secado del material en el suelo y en la estufa

Las cantidades de material usado en cada amasada se detallan a continuación.

Tabla 27. Peso de los componentes en cada amasada para fabricar probetas prismáticas

PROBETAS PRISMÁTICAS					
Amasada	Fecha fabricación	Material seco (Kg)	3,5 % Cemento (Kg)	7,61 % Agua (Kg)	Masa total (Kg)
1	03/01/2008	71,04	2,486	5,595	79,122
2	03/01/2008	69,76	2,442	5,495	77,696
3	03/01/2008	71,62	2,507	5,641	79,768
4	08/01/2008	72,04	2,521	5,674	80,236
5	08/01/2008	73,14	2,560	5,761	81,461
6	08/01/2008	72,88	2,551	5,740	81,171
7	09/01/2008	71,98	2,519	5,669	80,169
8	09/01/2008	72,2	2,527	5,687	80,414
9	09/01/2008	73,54	2,574	5,792	81,906
10	14/01/2008	71,36	2,498	5,621	79,478
11	14/01/2008	71,54	2,504	5,635	79,679
12	14/01/2008	72,52	2,538	5,712	80,770
13	04/02/2008	72,34	2,532	5,698	80,570
14	04/02/2008	72,98	2,554	5,748	81,282
15	04/02/2008	73,06	2,557	5,754	81,372
16	25/02/2008	72,38	2,533	5,701	80,614
17	25/02/2008	73,23	2,563	5,768	81,561
18	25/02/2008	71,54	2,504	5,635	79,679

Tras el amasado, se procede al vertido del material resultante en la carretilla para comenzar a fabricar las probetas. Previamente se preparan 2 moldes y se les aplica desencofrante en su interior.

Las probetas se realizan con 3 capas de material en cada molde y son compactadas una a una mediante la mesa vibrante durante un tiempo de 15 s y el contrapeso de 34,10 kg dispuesto en la parte superior. Estas se rellenan hasta sobrepasar ligeramente la altura del molde con la ayuda de un collarín que se dispone en la parte superior del mismo. En las

probetas fabricadas en la segunda fase se comprueba que estas se pueden realizar con 2 capas de material sin que disminuya la densidad, reduciendo por tanto las superficies de contacto.



Foto 84. Dispositivo de compactación con collarín y contrapeso



Foto 85. Fabricación de probeta prismática



Foto 86. Enrasado de probetas prismáticas



Foto 87. Acabado con mortero de la probeta

Tras estos pasos, se procede a la retirada del collarín y al enrasado del material sobrante hasta la altura del molde. Para el acabado de la cara superior de cada probeta se usa el mortero fabricado con material que pasa por el tamiz de 5 mm, (agua y cemento), con el objeto de dejar la superficie libre lo más lisa posible.

Tras la fabricación de las probetas, estas son introducidas en la cámara de curado (20°C y 95% de humedad), donde permanecen 24 horas, se desmoldan y se vuelven a introducir para continuar su curado en las mismas condiciones hasta la fecha de rotura.

El desmoldeo se realiza con cuidado para que las probetas no se rompan. Hay que tener en cuenta su elevado peso (aproximadamente 30 Kg) y su baja resistencia tras un único día de curado. Para evitar que la probeta trabaje a flexión a edades tempranas y haya riesgo de rotura, esta se apoya sobre una base metálica que se dispone al lado de la probeta a desmoldar y sobre la que se arrastra tras quitar el molde. Posteriormente se introduce la probeta con la base en la cámara de curado y no se quita la base hasta pasados 5 días.



Fotos 88 y 89. Desmoldeo de probetas prismáticas



Foto 90. Disposición en la cámara de curado de las probetas prismáticas

El resto de las probetas prismáticas se fabrican igual. Tanto los moldes, como las probetas nada más fabricarse se pesan, así como al desmoldar y antes de ensayar para determinar la densidad de cada probeta y referenciarla a la máxima Proctor modificado, además de conocer la diferencia de peso que sufre la probeta en la cámara de curado. Los datos se incluyen en las tablas A2.12 y A2.13 del anejo 2.

### 5.3. ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE

El ensayo se realiza siguiendo las directrices de las normas NLT-305/90<sup>(49)</sup> y UNE-EN 12390-3<sup>(58)</sup> resistencia a compresión simple de materiales tratados con conglomerantes hidráulicos, sobre las probetas cilíndricas y las mitades resultantes de las probetas prismáticas rotas a flexotracción. Para el caso de probetas cilíndricas, se saca la probeta de la cámara de curado una hora antes del ensayo para que pierda la humedad superficial.

La rotura se programa para que la carga se detenga cuando se observa una caída del 5% en la tensión para evitar que la probeta se desmorone. El aspecto al romper de las probetas es el que se muestra en la siguiente figura.



Foto 91. Colocación de una probeta cilíndrica para romper a compresión



Foto 92. Rotura de una probeta cilíndrica

En el caso de las mitades de probeta prismática, se aplica la carga mediante unas chapas auxiliares de 15 x 15 cm que se colocan en los platos de la prensa, de forma que se aplica la carga sobre dos de los lados de un cubo de 15 x 15 x 15 cm.

De manera similar se programa la rotura para que la carga se detenga cuando se observa una caída del 5% en la tensión. En la fotografía se muestra el aspecto al romper de las probetas.



Foto 93. Colocación de la mitad de una prismática para romper a compresión



Foto 94. Rotura de la probeta mitad de una prismática ya ensayada

Como la Norma NLT-305/90<sup>(49)</sup> determina una velocidad de carga de 0,1 MPa/s y el programa de control de la prensa sólo admite la velocidad en KN/s, se realiza la conversión en función del área sobre la que actúa la carga.

Tabla 28. Transformación de los datos normalizados a los introducidos en las prensas

COMPRESIÓN SIMPLE					
	L (mm)	d (mm)	s (MPa/s)	R (KN/s)	R (KP/s)
Cilíndrica	180	150	0,1	1,767	176,715
Prismática	150	150	0,1	2,250	225

#### 5.4. ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

Este ensayo se realiza tanto sobre probetas cilíndricas, como sobre las mitades resultantes de las probetas prismáticas rotas a flexotracción siguiendo las prescripciones de las normas UNE-EN 12390-6<sup>(62)</sup> y NLT-304/89<sup>(63)</sup>, ensayos de hormigón endurecido, parte 6: resistencia a tracción indirecta de probetas. Las primeras se sacan de la cámara de curado una hora antes del ensayo para que pierda la humedad superficial.

La rotura se programa para que la carga se detenga cuando se observa una caída del 5% en la tensión para evitar que la probeta se desmorone. El aspecto al romper de las probetas es el que se muestra en la foto 96 (se produce una fisura en la dirección de la carga).



Foto 95. Colocación de una probeta cilíndrica para ensayar a tracción indirecta



Foto 96. Rotura a tracción indirecta de una probeta cilíndrica

En el caso de las mitades de probeta prismática, se aplica la carga en dirección perpendicular a la directriz de la pieza de forma que el cuchillo de carga mida 15 cm. Se retiran los soportes laterales del aparato de rotura para que quepa la probeta.

De manera similar se programa la rotura para que la carga se detenga cuando se observa una caída del 5% en la tensión. El aspecto al romper de las probetas es el siguiente:



Foto 97. Colocación de la mitad de una probeta prismática para ensayar a tracción indirecta



Foto 98. Rotura de una probeta prismática a tracción indirecta

Como la Norma UNE-EN 12390-6<sup>(62)</sup> determina que la velocidad de carga sea de 0,04 MPa/s y el programa de control de la prensa sólo admite la velocidad en KN/s, se realiza la conversión según la fórmula que propone la misma norma.

Tabla 29. Transformación de los datos normalizados a los introducidos en las prensas

TRACCIÓN INDIRECTA					
	L (mm)	d (mm)	s (MPa/s)	R (KN/s)	R (KP/s)
Cilíndrica	180	150	0,04	1,696	169,646
Prismática	150	150	0,04	1,414	141,372

## 5.5. ENSAYO DE FLEXOTRACCIÓN

Este ensayo se realiza siguiendo las prescripciones de la norma UNE-EN 12390-5<sup>(64)</sup>, ensayos de hormigón endurecido, parte 5: resistencia a flexión de probetas. Para ello, se dispone de un equipo auxiliar de ensayo para flexión que cuenta con una base con dos rodillos de 40 mm de diámetro separados 45 cm. En la parte superior se acoplan dos rodillos de 40 mm sobre el plato. De este modo se realiza el ensayo con dos rodillos de carga separados 15 cm para que la ley de momentos sea uniforme en los 15 cm centrales, produciéndose la rotura en la sección más débil de dicho tramo.

Igual que en los otros casos la rotura se programa para que la carga se detenga cuando se observa una caída del 5% en la tensión para evitar que la probeta se desmorone. El aspecto al romper de las probetas es el que se muestra en la siguiente figura. En la mayoría de los casos la probeta no se separa en dos mitades sino que se fisura. Posteriormente se separan las dos partes de forma manual.



Foto 99. Colocación de la probeta prismática para ensayar a flexotracción



Foto 100. Aspecto de la probeta fisurada

En la Norma UNE-EN 12390-5 se determina que la velocidad de carga sea 0,04 MPa/s por lo que se realiza la conversión según la fórmula que propone la misma norma, para introducir en el programa de control de la prensa KN/s.

Tabla 30. Transformación de los datos normalizados a los introducidos en la prensa

FLEXOTRACCIÓN						
	L (mm)	d (mm)	s (MPa/s)	L (mm)	R (KN/s)	R (KP/s)
Prismática	150	150	0,04	450	0,3	30

### 5.6. ENSAYOS DE FATIGA

Los ensayos dinámicos a fatiga se realizan en la prensa pórtico donde se acoplan como transmisores de carga dos rodillos de Ø 40 mm separados 15 cm y apoyados sobre la probeta, que a su vez se coloca sobre otros dos rodillos de Ø 40 mm separados 45 cm.

Para realizar los ensayos de fatiga se aplican a las probetas prismáticas un número indefinido de ciclos de sollicitación dinámica cuyo rango carga máxima – carga mínima varía en función del grupo elegido:

Grupo 1º: carga máxima – mínima = 50% - 25% de la tensión de rotura

Grupo 2º: carga máxima – mínima = 55% - 30% de la tensión de rotura

Grupo 3º: carga máxima – mínima = 80% - 40% de la tensión de rotura

Para determinar la tensión de rotura ( $R_f$ ), en la primera fase se rompió a flexotracción una de cada pareja de probetas fabricadas con cada amasada y posteriormente, con el valor  $R_f$  medio obtenido de 0,69 MPa, se rompió la segunda probeta a fatiga en el grupo definido.

En la segunda fase, con el fin de disponer de un mayor número de valores de rotura del material a fatiga dinámica, se rompen sólo algunas probetas a flexotracción. Cuando se tiene una probeta pareja fabricada en la misma amasada que se haya roto a flexotracción, se adopta este valor como tensión de rotura. En las probetas que no disponen de compañera ensayada a flexotracción se adopta como tensión máxima de rotura 0,60 MPa o 0,69 MPa (valor medio de todas las probetas rotas en la primera fase), de acuerdo con los resultados obtenidos en las probetas anteriores ensayadas a flexotracción (en la segunda fase se obtuvieron valores más bajos).

Definidas la carga inicial y final de aplicación a la probeta, se realizan el ensayo con una frecuencia de 7 Hz determinando el número de ciclos, el tiempo de aplicación de carga y el desplazamiento.



Foto 101. Ensayo a fatiga de una probeta prismática

## 5.7. ENSAYO DE MEDICIÓN DEL MÓDULO

Ante la carencia de una prensa servohidráulica capaz de aplicar cargas cíclicas sinusoidales, pues sólo se dispone de una de gran tamaño empleada en los ensayos de fatiga que hay que compartir con otros estudios que se llevan a cabo en este laboratorio de la Escuela Politécnica de Burgos, se decidió medir el módulo estático en lugar del módulo dinámico. Para ello se empleó una prensa dotada del equipo informático capaz de gravar de forma automática los valores de carga y desplazamiento medidos por los extensómetros.

De acuerdo con el manual de firmes de capas tratadas con cemento<sup>(18)</sup> publicado por CEDEX-IECA, el módulo dinámico suele dar valores entre un 10 y un 15% más altos que el módulo estático.

Para el ensayo se emplean 15 probetas fabricadas en moldes de  $\varnothing$  15,24 x 17,78 cm, de las cuales se ensayan 3 probetas a la edad de 7 días (denominadas M.5.7, M.5.8 y M.5.9) con una velocidad de carga de 8,83 KN/s, y otras 12 probetas (M.5.3 y M.5.4 con una edad de 240 días, M.4.1, M.4.9, M.5.1, M.5.2, M.5.5 y M.5.6 con más de un año de edad y M.4.2, M.4.5, M.4.6 y M.4.8 con más de dos años en la cámara), todas estas a una velocidad de 4,26 KN/s. Todos los módulos se miden a partir de ensayos de compresión y no de tracción directa.



Foto 102. Equipo empleado en la medición del módulo.



Foto 103. Detalle de la probeta rota a compresión para medir el módulo

La obtención del módulo de elasticidad se lleva a cabo de acuerdo con la norma ASTM C469-94 standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression<sup>(65)</sup>, dado que la norma NLT-349/90 se refiere a la medida del módulo dinámico. También se consultó la norma mexicana NMX-C-128-1997, determinación del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson<sup>(66)</sup>, que resulta similar a la citada ASTM. Si bien dichas Normas están confeccionadas para el hormigón, el sistema de obtención del módulo es perfectamente trasladable al caso del material reciclado.

## 5.8. ENSAYOS DE TOMOGRAFÍA AXIAL COMPUTERIZADA

La TAC es la reconstrucción por medio de un ordenador de un plano tomográfico de un objeto. La tomografía se obtiene mediante el movimiento combinado del tubo de rayos X hacia un lado mientras la placa radiográfica se mueve hacia el contrario, por lo que una superficie plana del objeto de estudio es perfectamente visible, y las áreas por encima y por debajo quedan borradas.

La imagen se consigue por medio de medidas de absorción de rayos X hechas alrededor del objeto. Es una prueba de diagnóstico radiológica mediante la utilización de rayos X y procesamiento de las imágenes por ordenador, con el que se reconstruyen los

planos atravesados por los rayos. La imagen se construye midiendo la absorción de rayos X por el material atravesado. Al procesar las imágenes se pueden ver cortes tridimensionales en un monitor de televisión o en una radiografía. Toda imagen encierra una gran cantidad de información acerca del objeto representado. Así se consiguen imágenes validas del interior del material, permitiendo diagnósticos muy precisos.



Foto 104. Detalle TAC, emisión de rayos x.

El equipo de tomografía axial computerizada (TAC) del que dispone la Universidad de Burgos, es un equipo de rayos X (Instalación de 2ª Categoría) que consta de un tubo Yxlon de 225Kv/30mA para la inspección de restos arqueológicos y diversas piezas para estudios propios de la universidad. Se trata de una cabina metálica diseñada como construcción sándwich acero-plomo-acero, de forma que operando con una radiación máxima de 225Kv/30mA dentro de la cabina, la dosis máxima de radiación a una distancia de 100 mm de la superficie externa de la cabina no exceda de 2.5  $\mu$ Sv/h. Esta cabina esta realizada en mono bloque con todo el equipo incorporado.



Foto 105. Cabina TAC



Foto 106. Interior de la cabina

Una Tomografía Axial Computerizada realizada sobre las probetas de materiales tratados con cemento, ofrece una serie de imágenes de secciones de la probeta a distintas alturas. El número de secciones, distancias entre secciones y resolución obtenida, viene marcada por el tiempo disponible.

La probeta permanece en posición vertical sobre una base que asciende y gira dentro del tubo que genera los rayos X. El scanner presenta un sistema para la recogida de datos, el sistema de procesado de los mismos y reconstrucción de la imagen, y un sistema de visualización y de archivo. La exploración helicoidal (en vez de circular) produce información tridimensional que se utiliza hoy para reconstruir la estructura espacial de sistemas que se incorporan a entornos de realidad virtual, constituyendo este método el estado del arte de esta técnica.

Para la realización de las tomografías, se colocaron 2 probetas cilíndricas (A1.2 y A1.6), una encima de la otra, sobre la base móvil. Esta base está dotada de un movimiento sobre un eje vertical y de una rotación sobre este mismo eje. Mediante estos movimientos se realiza una tomografía helicoidal que permite la reconstrucción volumétrica de las probetas.

Aunque se pretendía observar la diferencia entre las probetas antes y después de la rotura a compresión simple y a tracción indirecta, no ha sido posible la realización de las TAC después de la rotura ya que la probeta modifica la sección al romper.

## CAPÍTULO 6



## RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS DATOS



## 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS DATOS

En este capítulo, primero se estudian los resultados obtenidos en la obra y en los ensayos previos llevados a cabo en la misma, para proceder a continuación a analizar los resultados obtenidos en el laboratorio y diseñados para esta Tesis. Entre estos últimos, se diferencian los ensayos realizados sobre probetas cilíndricas (a compresión y a tracción indirecta) y los realizados sobre probetas prismáticas, que se rompen bien a flexotracción, bien a fatiga. Los dos medios prismas obtenidos en el ensayo de flexotracción, son a su vez rotos a compresión y a tracción indirecta, obteniendo las relaciones entre las diferentes características mecánicas del material.

Finalmente se determina la ley de fatiga del material reciclado obtenida en los ensayos dinámicos de fatiga. Esta se corrobora, rompiendo a compresión y tracción indirecta los semiprismas obtenidos en el ensayo de fatiga, estimando en cada caso la resistencia a flexotracción de cada probeta a partir de las relaciones establecidas anteriormente entre dichas resistencias y obteniendo de nuevo en cada caso las leyes de fatiga del material reciclado.

### 6.1. ENSAYOS PREVIOS DE OBRA

#### 6.1.1. Resultados resistencia – densidad obtenidos en obra

Según se ha comentado en el capítulo 5 y de acuerdo con los datos incluidos en el anejo 2 (tablas A2.2 a A2.4), las resistencias medias obtenidas en obra fueron:

Tabla 31. Resultados obtenidos en el reciclado de la carretera SA-801

Tramo	% cemento	Humedad óptima	Densidad máxima	Resistencia media	
				3 días	7 días
Pk 13+500 a 15+500	4%	7,4	2,10	2,30	3,026
Pk 0+000 a 13+500	3,5%	6,1	2,17	2,36	2,913

Como el volumen de resultados disponibles con el 4% son escasos (solo 9), se calcula únicamente la relación entre la densidad obtenida en obra y la resistencia a compresión para probetas con el 3,5% de cemento (en total 33 casos).

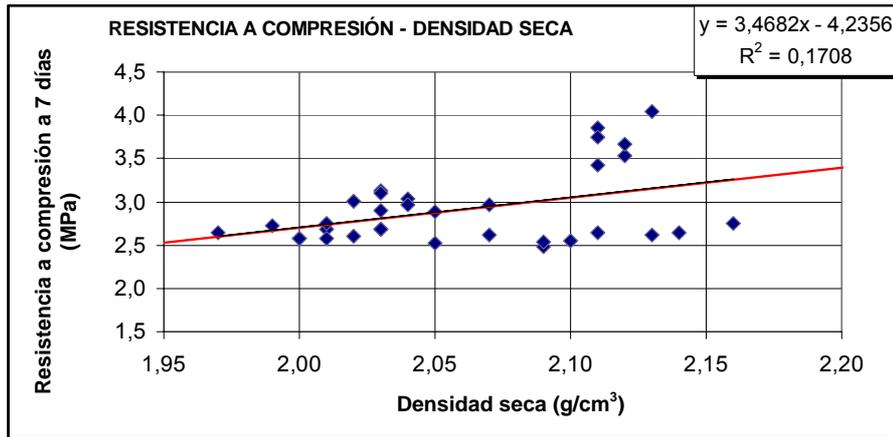


Figura 24. Relación densidad-resistencia a compresión en las probetas de obra (3,5 % cemento)

Es decir, ambas variables se encuentran relacionadas a la edad de 7 días por la ecuación de primer grado siguiente (aunque la dispersión es muy alta):

$$R_c = 3,4682 \cdot d - 4,2356$$

Aunque en este caso la dispersión obtenida en la obra es elevada ( $R^2 = 0,1708$ ), es evidente que existe una relación entre la resistencia a compresión y la densidad, reduciéndose de manera creciente la resistencia a compresión a medida que disminuye la densidad obtenida en las probetas. Se dispone de 33 datos pero la dispersión de las características del material a lo largo de toda la obra hace que esta relación marcada por una ecuación de primer grado no se pueda generalizar. De hecho, se obtienen resistencias tan diferentes de 2,6 MPa y 3,8 MPa para una misma densidad de 2,11 g/cm<sup>3</sup>.

Una esquemática interpretación estadística de estos datos obtenidos, considerados como variables cuantitativas continuas, sería la siguiente:

Tablas 32 y 33. Análisis estadístico de la resistencia y densidad con 3,5% de cemento a 7 días (datos de obra)

RESISTENCIA	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	33
Media	2,9130
Varianza	0,1834
Desviación estándar	0,4282
Mínimo	2,48
Máximo	4,04
Rango	1,56
Coficiente de Asimetría	3,0975
Coficiente de Curtosis	0,8685

DENSIDAD	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	33
Media	2,0612
Varianza	0,0026
Desviación estándar	0,0510
Mínimo	1,97
Máximo	2,16
Rango	0,19
Coficiente de Asimetría	0,4617
Coficiente de Curtosis	-1,3754

Cada parámetro tiene el significado estadístico universalmente reconocido<sup>(67)</sup>:

Varianza: promedio de los cuadrados de las desviaciones de los datos respecto a su media.

Desviación estándar: raíz cuadrada de la varianza.

Rango o recorrido: diferencia entre el mayor y el menor de los datos.

Coefficiente de asimetría: mide la simetría de la distribución de la muestra. Es nulo si los datos son simétricos, positivo si los datos presentan una cola alargada hacia la derecha y negativo si la presentan a la izquierda. Cuanto mayor sea el valor absoluto del coeficiente, más asimétrica será la distribución de los datos.

Coefficiente de curtosis: mide la tendencia de la muestra hacia una distribución normal. Si es nulo (mesocúrticos), significa que los datos tienden a una distribución normal, si es mayor que 0 (leptocúrticos), significa que los datos aparecen alejados de la media menos de lo que se esperaría en una distribución normal con su misma desviación típica, mientras que si es menor que 0 (platicúrticos) significa que los datos aparecen alejados de la media más de lo que se esperaría en una distribución normal con su misma desviación típica

El parámetro media es una medida de posición, la desviación estándar, la varianza y el rango representan medidas de dispersión, mientras que los coeficientes de asimetría y curtosis representan medidas de asimetría y apuntamiento.

Como complemento, además se realiza un análisis mediante el modelo de regresión lineal de la resistencia a compresión y la densidad para comprobar el análisis mediante línea de tendencia realizado anteriormente con la hoja EXCEL de Microsoft.

El primer gráfico corresponde al análisis mediante recta de regresión entre los valores de resistencia a compresión y densidad seca de probetas con un 3,5% de cemento a la edad de 7 días obtenidos en obra.

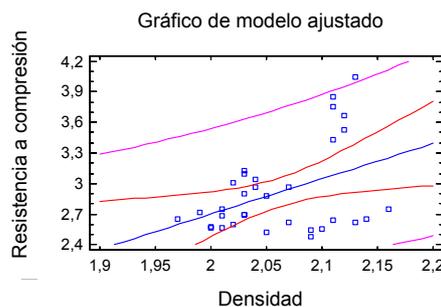


Figura 25. Análisis mediante recta de regresión entre resistencia – densidad (3,5% de cemento a 7 días)

Tabla 34. Análisis estadístico densidad – resistencia. Datos de obra

3,5% CEMENTO Y 7 DÍAS	
Coefficiente de correlación	0,4133
$R^2$	0,1708
Error estándar de la estimación	0,3962
Error promedio	0,3071
Estadístico Durbin-Watson	0,3726 (P=0,0000)

El coeficiente de correlación de Pearson es una medida de dependencia lineal entre dos variables que está comprendido entre -1 y 1 y muestra la relación existente entre estas variables. La relación será mayor a medida que el coeficiente se aproxime a 1. El error estándar de la estimación muestra la desviación estándar del residuo. El estadístico Durbin-Watson analiza los residuos para determinar si hay una correlación significativa entre las variables. En este caso si existe una relación estadísticamente significativa entre la resistencia a compresión y la densidad para un nivel de confianza del 95% (hay indicio de una posible correlación serial).

El modelo explica un 17,08 % de la variabilidad en la resistencia a compresión. El coeficiente de correlación es 0,4133 indicando una relación relativamente débil entre las variables. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 0,3962. El error promedio es el error absoluto medio es decir el valor medio de los residuos.

Respecto a los valores de densidad obtenidos en obra (incluidos en el anejo 2, tabla A2.5), se observa que son muy bajos respecto a la densidad Proctor de referencia (media de 94,25 %). Esto se debe a que la densidad Proctor de referencia correspondiente a un único ensayo es muy alta y probablemente errónea (2,17 g/cm<sup>3</sup>) para el 3,5% de cemento, cuando se obtiene sólo 2,10 g/cm<sup>3</sup> para el 4% en la obra. Este mismo valor se obtiene en el laboratorio de la Escuela donde se realizan estos ensayos. Por esta razón en las probetas realizadas en el laboratorio para los ensayos de esta tesis, se ha fijado como densidad objetivo 2,10 g/cm<sup>3</sup>.

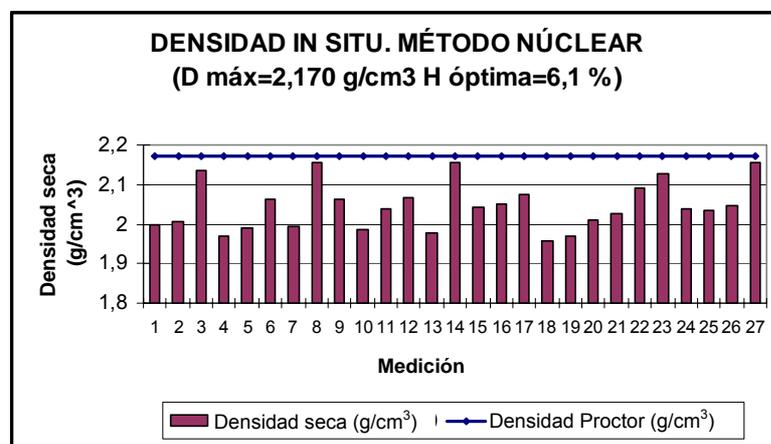


Figura 26. Resultados de densidades medidas in situ (tramo 3,5% cemento)

Tabla 35. Análisis estadístico de la densidad in situ. Datos de obra

DENSIDAD IN SITU TRAMO 3,5% CEMENTO	
Número	27
Media	2,0452
Varianza	0,0036
Desviación estándar	0,0602
Mínimo	1,9570
Máximo	2,1570
Rango	0,2000
Coefficiente de Asimetría	1,1471
Coefficiente de Curtosis	-0,6403

Analizando los parámetros estadísticos, se observa un valor medio logrado en la ejecución ( $2,05 \text{ g/cm}^3$ ) inferior al obtenido en las 33 probetas ( $2,06 \text{ g/cm}^3$ ) que se han roto a compresión en la obra con la misma edad y contenido de cemento (ver tablas A.2.2 a A.2.4). En este caso la varianza es algo mayor aunque muy próxima. El coeficiente de asimetría indica una asimetría positiva, luego la curva de densidad está sesgada hacia la derecha. El valor negativo del coeficiente de curtosis indica que la muestra contiene algunos valores que alejan la muestra de una distribución normal.

No obstante, comparando la muestra con una distribuida de forma normal, se puede observar que la distribución se acerca mucho a una normal.

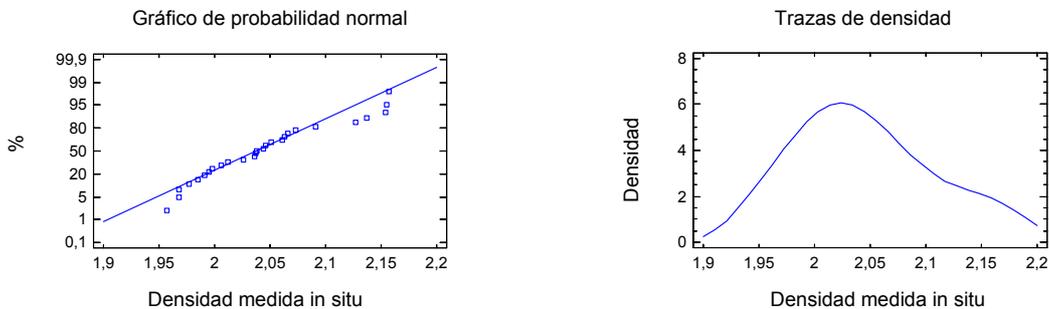


Figura 27. Comparación densidades medidas in situ (3,5% cemento) con una distribución normal

En los datos de densidad in situ medidos en el tramo dosificado con el 4% de cemento, se observan resultados mucho más ajustados al ser una muestra menor y considerar una densidad Proctor de referencia de  $2,06 \text{ g/cm}^3$ .

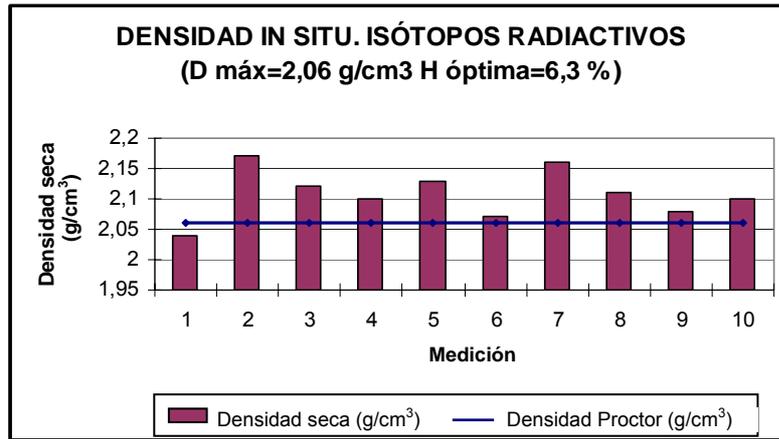


Figura 28. Resultados de densidades medidas in situ. Tramo 4% cemento.

Tabla 36. Análisis estadístico de la densidad in situ. Datos de obra

DENSIDAD IN SITU TRAMO 4% CEMENTO	
Número	10
Media	2,1080
Varianza	0,0016
Desviación estándar	0,0397
Mínimo	2,0400
Máximo	2,1700
Rango	0,1300
Coefficiente de Asimetría	-0,0028
Coefficiente de Curtosis	-0,1584

En este caso del tramo realizado con el 4% de cemento, la densidad media medida in situ (2,10) resulta mayor que en el caso de las densidades obtenidas en las probetas (2,06). La varianza es sensiblemente menor. El coeficiente de asimetría indica una asimetría negativa, es decir, la curva de densidad está ligeramente sesgada hacia la izquierda. El valor negativo del coeficiente de curtosis indica que la muestra contiene algunos valores que alejan la muestra de una distribución normal, aunque muy poco. De hecho, comparando la muestra con una muestra distribuida de forma normal, se puede observar que la distribución se aproxima mucho a una normal.

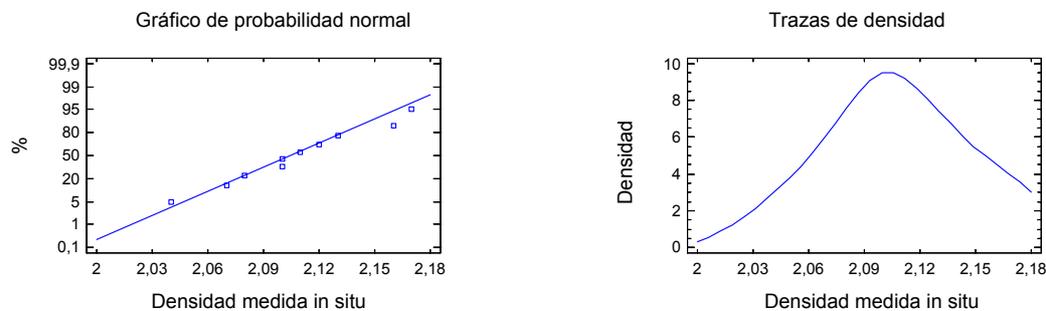


Figura 29. Comparación densidades medidas in situ (4% cemento) con una distribución normal

**6.1.2. Ensayos de dosificación**

El análisis estadístico de los datos obtenidos en el estudio previo de dosificación del reciclado realizado en la obra, que se incluyen en la tabla A2.1 del anejo 2, arroja los siguientes resultados:

**6.1.2.1. Dosificación del 2,5% de cemento**

Los resultados de las seis probetas ensayadas son:

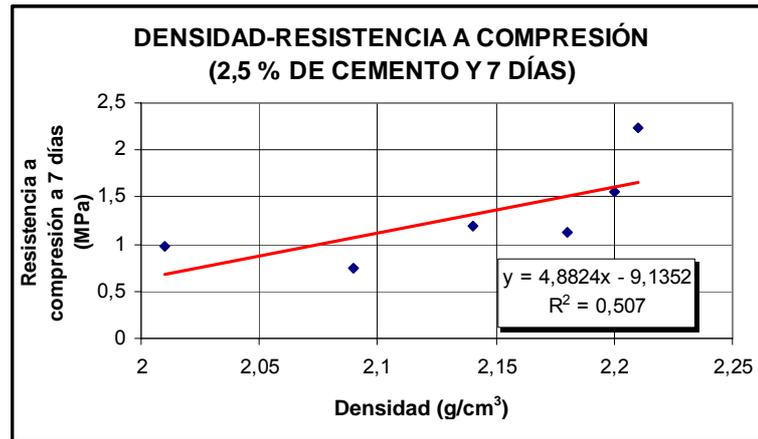


Figura 30. Relación densidad – resistencia compresión 2,5% cemento. Ensayos previos

Tablas 37 y 38. Análisis estadístico de la resistencia y la densidad. 2,5% de cemento. Ensayos previos

RESISTENCIA PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	6
Media	1,305
Varianza	0,2772
Desviación estándar	0,5265
Mínimo	0,75
Máximo	2,23
Rango	1,48
Coficiente de Asimetría	1,2167
Coficiente de Curtosis	0,7235

DENSIDAD PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	6
Media	2,1383
Varianza	0,0059
Desviación estándar	0,0768
Mínimo	2,01
Máximo	2,21
Rango	0,2
Coficiente de Asimetría	-1,0280
Coficiente de Curtosis	0,1017

Para un contenido de cemento del 2,5% se obtiene una resistencia media baja (1,305 MPa) y una densidad seca alta (2,138 g/cm<sup>3</sup>). El contenido de cemento influye lógicamente en la resistencia a compresión a 7 días.

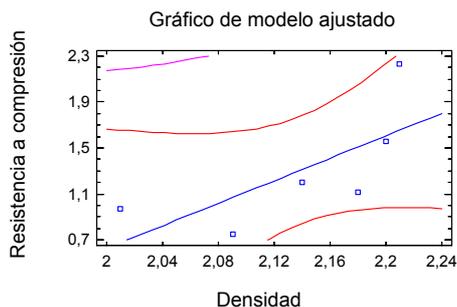


Figura 31. Análisis mediante recta de regresión

Tabla 39. Análisis estadístico relación densidad – resistencia 2,5% de cemento. Ensayos previos

2,5 % CEMENTO Y 7 DÍAS	
Coefficiente de correlación	0,7121
R <sup>2</sup>	0,5070
Error estándar de la estimación	0,4133
Error promedio	0,2889
Estadístico Durbin-Watson	2,3046 (P=0,2566)

### 6.1.2.2. Dosificación del 3,5% de cemento

Para una dosificación del 3,5% de cemento ESP VI-1 los resultados son:

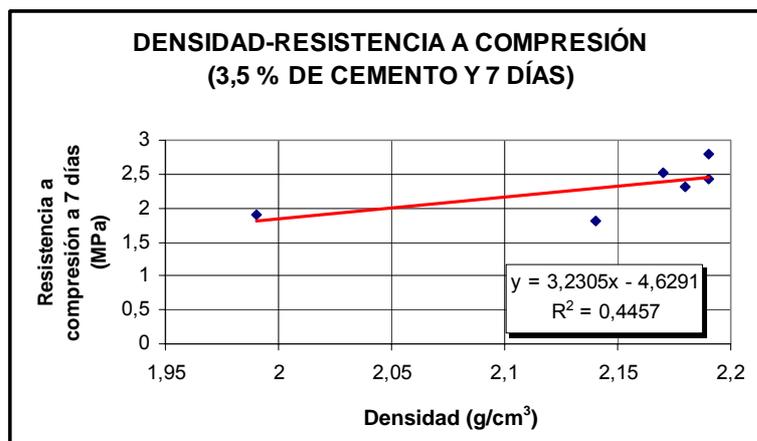


Figura 32. Relación densidad – resistencia compresión 3,5% cemento. Ensayos previos

Tablas 40 y 41. Análisis estadístico de la resistencia y la densidad 3,5% de cemento. Ensayos previos

RESISTENCIA	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	6
Media	2,295
Varianza	0,1402
Desviación estándar	0,3744
Mínimo	1,81
Máximo	2,8
Rango	0,99
Coefficiente de Asimetría	-0,1741
Coefficiente de Curtosis	-0,5477

DENSIDAD	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	6
Media	2,1433
Varianza	0,0060
Desviación estándar	0,0774
Mínimo	1,99
Máximo	2,19
Rango	0,2
Coefficiente de Asimetría	-2,159
Coefficiente de Curtosis	2,3884

Para un contenido de cemento del 3,5% se obtiene una resistencia suficiente de acuerdo con las exigencias (2,295 MPa) y una densidad seca alta (2,143 g/cm<sup>3</sup>). Los valores de la varianza para la resistencia no son menores que para el caso de 2,5% cemento, como cabría esperar, pero puede ser porque la muestra es muy reducida.

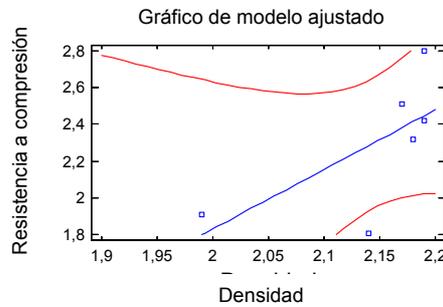


Figura 33. Análisis mediante recta de regresión

Tabla 42. Análisis estadístico relación densidad – resistencia 3,5% de cemento. Ensayos previos

3,5 % CEMENTO Y 7 DÍAS	
Coefficiente de correlación	0,6676
R <sup>2</sup>	44,5667
Error estándar de la estimación	0,3117
Error promedio	0,1978
Estadístico Durbin-Watson	2,9451 (P=0,0867)

### 6.1.2.3. Dosificación del 4,5% de cemento

Y por último para una dotación del 4,5% de cemento se obtienen los siguientes valores:

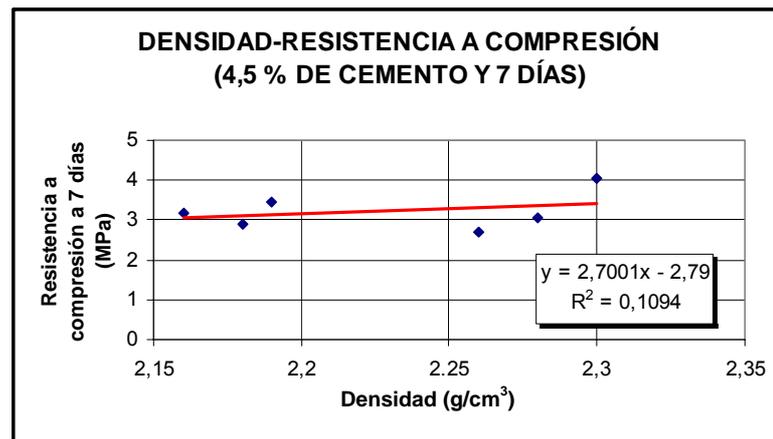


Figura 34. Relación densidad – resistencia compresión 4,5% cemento. Ensayos previos

Tablas 43 y 44. Análisis estadístico de la resistencia y la densidad 4,5% de cemento. Ensayos previos

RESISTENCIA	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	6
Media	3,2267
Varianza	0,2303
Desviación estándar	2,71
Mínimo	0,4799
Máximo	4,06
Rango	1,35
Coficiente de Asimetría	1,1251
Coficiente de Curtosis	0,6262

DENSIDAD	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	6
Media	2,2283
Varianza	0,0035
Desviación estándar	0,0588
Mínimo	2,16
Máximo	2,3
Rango	0,14
Coficiente de Asimetría	0,0730
Coficiente de Curtosis	-1,2523

Para un contenido de cemento del 4,5% se obtiene una resistencia alta (3,227 MPa) y una densidad seca alta (2,228 g/cm<sup>3</sup>). Los valores de la varianza para la resistencia son menores que para el caso de 3,5% y 2,5% cemento. En este caso se corrobora la hipótesis de que la varianza disminuye al aumentar el contenido de cemento, al permitir un mezclado mejor y una mayor homogenización.

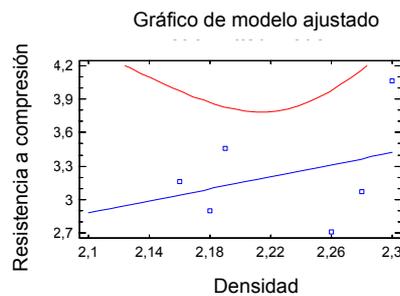


Figura 35. Análisis mediante recta de regresión

Tabla 45. Análisis estadístico relación densidad – resistencia 4,5% de cemento. Ensayos previos

4,5% DE CEMENTO Y 7 DÍAS	
Coficiente de correlación	0,3308
R <sup>2</sup>	10,9423
Error estándar de la estimación	0,5063
Error promedio	0,3648
Estadístico Durbin-Watson	1,4301 (P=0,0542)

En vista a los resultados expuestos, se decidió emplear en los ensayos de esta tesis una dosificación del 3,5 % de cemento ESP-VI-1 32,5N que consigue una densidad media en las probetas de 2,14 g/cm<sup>3</sup> (2,17 se consideró erróneamente en la obra). Como en la normativa vigente se exige en las obras el 98% de la densidad máxima, para que los resultados se correspondan con los valores reales y no con los máximos obtenidos, las probetas se realizan con el 98% de la densidad especificada (2,14) es decir con 2,10 g/cm<sup>3</sup>. Este valor de densidad, coincide con la densidad máxima obtenida en el ensayo Proctor modificado realizado en el laboratorio de la Escuela, correspondiendo una humedad óptima de 7,61%.

## 6.2. PROBETAS CILÍNDRICAS

Definida la dosificación, la investigación comienza con la realización de las probetas cilíndricas previstas en el plan de trabajo que se ensayan a compresión simple y tracción indirecta.

Todos los datos medidos en las 27 probetas cilíndricas ensayadas a compresión simple (17) y tracción indirecta (10) a las edades de 7, 28 y 90 días, se recogen en la tabla A2.14 del anejo 2. A continuación se analizan en tablas resumen los resultados obtenidos.

### 6.2.1. Ensayos de rotura a compresión simple

Para estudiar los resultados se organiza la tabla por tipos de ensayo y edad y se analizan los datos de los ensayos a compresión simple.

Tabla 46. Resultados obtenidos de resistencia a compresión simple en probeta cilíndrica

RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE				
Probeta nº	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Edad de curado (días)	Tensión de rotura (MPa)	Tensión Media (MPa)
A1.1	2,153	7	3,122	2,617
A1.2	2,161	7	3,008	
A1.3	2,153	7	2,887	
A2.1	2,119	7	2,327	
A2.2	2,121	7	2,091	
A2.3	2,108	7	2,270	
A2.5	2,127	28	2,997	
A3.1	2,141	28	3,134	
A3.2	2,125	28	3,372	
A1.5	2,160	90	4,493	3,960 (4,030)*
A1.6	2,157	90	4,085	
A1.7	2,169	90	4,458	
A2.7	2,167	90	3,472	
A2.8	2,124	90	3,716	
A3.4	2,123	90	3,638	
A3.5	2,122	90	3,970	
A3.6	2,119	90	3,851	

\* suprimiendo la probeta A.2.7

Los resultados obtenidos se exponen de forma gráfica relacionando resistencia a compresión – densidad de las probetas y se analizan estadísticamente. A la edad de 7 días se obtiene:

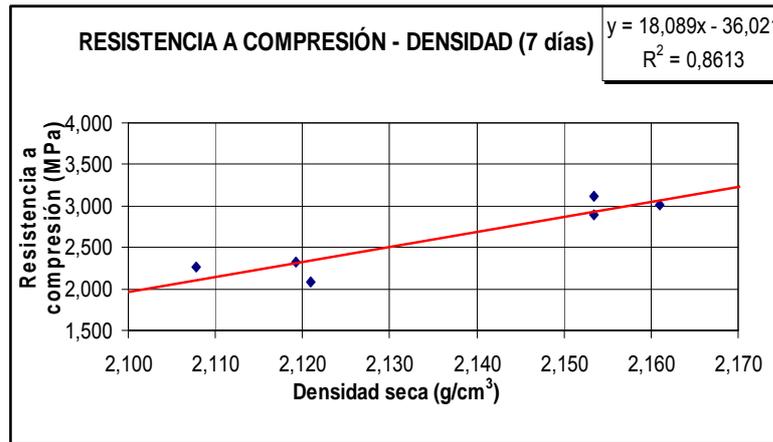


Figura 36. Relación densidad – resistencia a compresión en probeta cilíndrica a 7 días

Tabla 47. Análisis estadístico resistencia a compresión a 7 días

COMPRESIÓN 7 DÍAS	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	6
Media	2,6175
Varianza	0,1924
Desviación estándar	0,4386
Mínimo	2,091
Máximo	3,122
Rango	1,031
Coficiente de Asimetría	-0,0174
Coficiente de Curtosis	-1,311

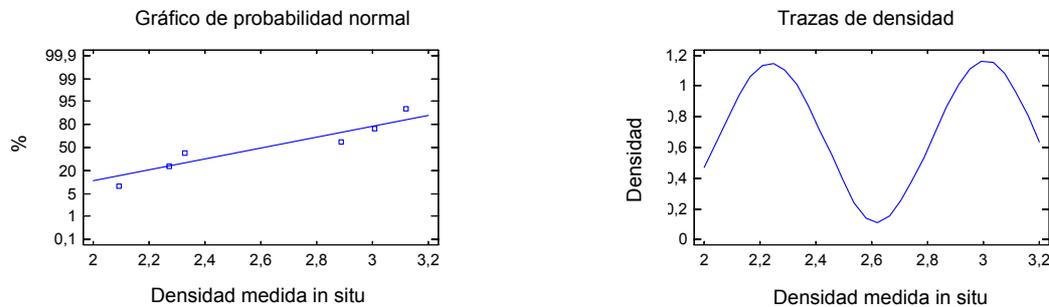


Figura 37. Comparación de resistencias a compresión a 7 días con una distribución normal

Como en los ensayos previos, se observa una relación estadísticamente significativa entre la resistencia a compresión a 7 días y la densidad seca. También se observa la diferencia clara en los valores de resistencia media de las probetas correspondientes a la 1ª y 2ª amasada (3,005 frente a 2,229 MPa). Esta diferencia se debe a la heterogeneidad del material que provoca variaciones en la granulometría de cada amasada (principalmente por la variación en el contenido de finos y el porcentaje de betún residual de los mismos). La relación viene dada por un módulo lineal, que explica un 86,13% de la variabilidad en la resistencia a 7 días, expresado por:

$$R_{c,7d} = 18,089 \cdot d - 36,021$$

Tabla 48. Análisis estadístico resistencia compresión - densidad a 7 días

R. COMPRESIÓN – DENSIDAD 7 días	
Coefficiente de correlación	0,9273
R <sup>2</sup>	0,8613
Error estándar de la estimación	0,1835
Error promedio	0,1222
Estadístico Durbin-Watson	2,3626 (P=0,1187)

A la edad de 28 días se han roto únicamente 3 probetas, pues dicha edad no resulta interesante para este tipo de materiales, al ser muy grande para controlar en obra y muy reducida para evaluar el comportamiento del material. Los resultados obtenidos son:

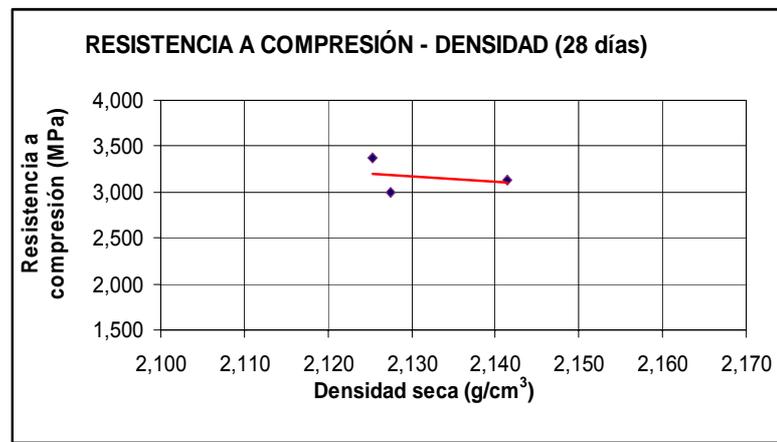


Figura 38. Relación densidad – resistencia a compresión en probeta cilíndrica a 28 días

Para el caso de probetas con una edad de 28 días, no se puede establecer ninguna relación entre la resistencia a compresión y la densidad, dado el escaso número de ensayos realizado.

Por último, a la edad de 90 días se han obtenido 8 resultados, de los cuales se puede suprimir la probeta A2.7 al obtenerse con una densidad elevada (2,167 g/cm<sup>3</sup>) un valor de resistencia irregularmente bajo (3,472 MPa) que modifica los resultados. La representación gráfica es la siguiente:

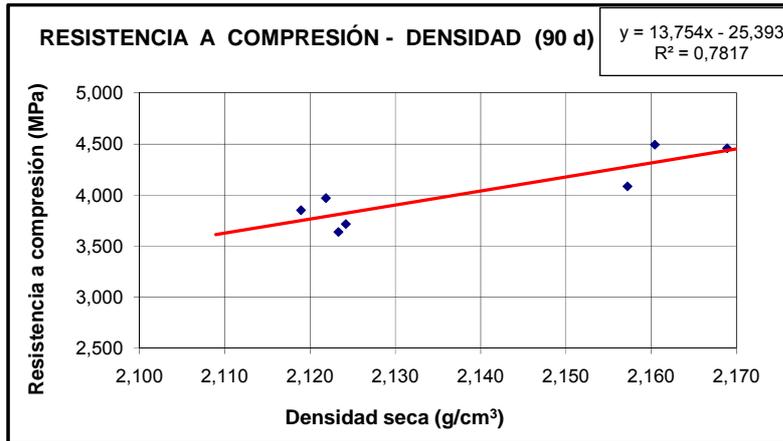


Figura 39. Relación densidad – resistencia a compresión en probeta cilíndrica a 90 días

Si se considerara la probeta A2.7, se obtendría una recta de regresión que responde a la ecuación  $y = 7,308 \cdot x - 11,698$  pero el valor  $R^2$  baja a 0,1951.

La importante dependencia de la resistencia respecto a la densidad obtenida vuelve a ponerse de manifiesto. La relación se expresa con un modelo lineal que explica un 78,17% de la variabilidad en la resistencia a 90 días y cuya expresione es:

$$R_{c,90d} = 13,754 \cdot d - 25,393$$

Tabla 49. Análisis estadístico resistencia a compresión a 90 días

COMPRESIÓN 90 DÍAS		
Parámetros estadísticos	Todos los resultados	Discretizando
Número	8	7
Media	3,9603	4,0301
Varianza	0,1373	0,1147
Desviación estándar	0,3705	0,3387
Mínimo	3,472	3,638
Máximo	4,493	4,493
Rango	1,021	0,855
Coefficiente de Asimetría	0,4772	0,4825
Coefficiente de Curtosis	-0,5876	-1,364

La varianza de los valores de resistencia disminuye con respecto a los de las probetas de 7 días como cambia esperar. La valoración estadística resulta:

Tabla 50. Análisis estadístico relación resistencia compresión – densidad a 90 días

R. COMPRESIÓN – DENSIDAD 90 d	
Coefficiente de correlación	0,8858
$R^2$	0,7817
Error estándar de la estimación	0,1722
Error promedio	0,1332
Estadístico Durbin-Watson	2,1702 (P=0,2380)

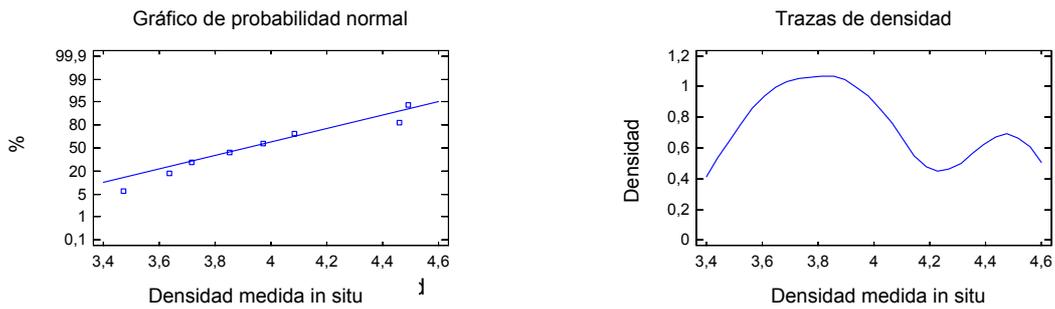


Figura 40. Comparación de resistencias a compresión a 90 días con una distribución normal

La evolución de las resistencias medias con la edad de las probetas (7, 28 y 90 días) es una curva creciente que tiende a la horizontal, es decir, la progresión en la obtención de resistencia aumenta cada vez más lentamente con el tiempo. La curva explica un 77,81% de la variabilidad.

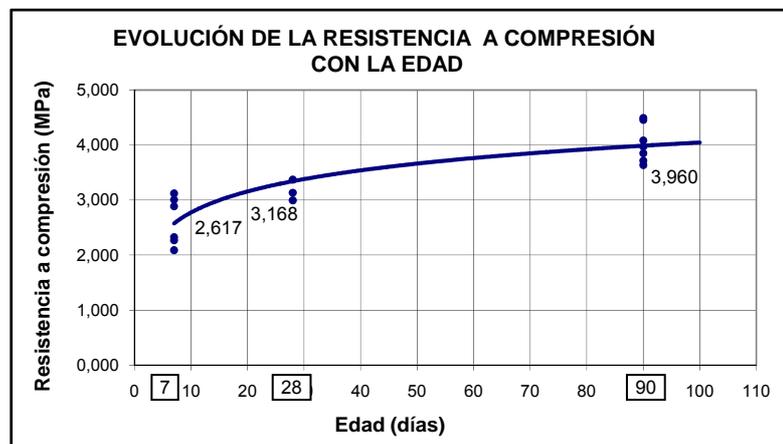


Figura 41. Evolución de la resistencia a compresión media en probeta cilíndrica 15,24 x 17,78 cm

Tabla 51. Incrementos de resistencia media a compresión con la edad en probeta cilíndrica

7 días	28 días	90 días	Δ 7-28 días	Δ 28-90 días	Δ 7-90 días
2,62	3,17	3,96	20,99%	24,92%	51,15%

La resistencia a compresión a largo plazo es superior a una vez y media la resistencia a compresión a 7 días, que es el valor que se mide y controla en obra.

$$R_{C,90d} = 1,5 R_{C,7d}$$

$$R_{C,28d} = 1,2 R_{C,7d}$$

### 6.2.2. Ensayos de rotura a tracción indirecta

Las 10 probetas cilíndricas de 15,24 x 17,78 cm que se han ensayado a tracción indirecta han obtenido los siguientes valores de resistencia:

Tabla 52. Resultados obtenidos a tracción indirecta en probeta cilíndrica

RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA				
Probeta nº	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Edad de curado (días)	Tensión de rotura (MPa)	Tensión Media (MPa)
A1.4	2,166	7	0,220	0,190
A2.4	2,171	7	0,160	
A2.6	2,147	28	0,221	0,259
A3.3	2,108	28	0,296	
A1.8	2,101	90	0,459	0,391
A1.9	2,157	90	0,450	
A2.9	2,090	90	0,323	
A3.7	2,128	90	0,365	
A3.8	2,138	90	0,384	
A3.9	2,103	90	0,363	

Aunque en el ensayo de tracción indirecta la carga la resiste una sección longitudinal de la probeta, se puede apreciar que también existe una relación estadísticamente significativa entre la resistencia a tracción indirecta y la densidad para un nivel de confianza del 95%. El reducido número de ensayos realizado sólo permite analizar los valores obtenidos a 90 días.

Si se considera la totalidad de los resultados la línea de regresión es una recta de ecuación:

$$Y = 0,9314 \cdot x - 1,5835$$

Pero el valor  $R^2$  es sólo 0,2005, es decir el modelo solo explica un 20% de la variabilidad de  $R_{ci}$ . Para obtener mayor precisión se elimina el valor de la probeta A1.8 que arroja una resistencia a tracción muy alta (0,459 MPa) con una densidad baja (2,101 g/cm<sup>3</sup>), obteniéndose un valor  $R^2 = 0,8513$ , y una relación que explica el 85% de la variabilidad:

$$R_{ci} = 1,6032 \cdot d - 3,0271$$

La representación gráfica es la siguiente:

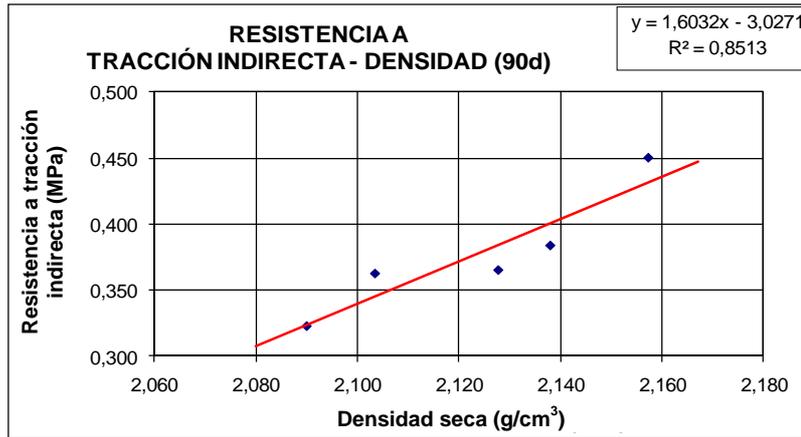


Figura 42. Relación densidad – resistencia a tracción en probeta cilíndrica a 90 días

Tabla 53. Análisis estadístico resistencia a tracción indirecta en probeta cilíndrica a 90 días

TRACCIÓN INDIRECTA 90 DÍAS		
Parámetros estadísticos	Todos los resultados	Discretizando
Número	6	5
Media	0,3907	0,3770
Varianza	0,0028	0,0022
Desviación estándar	0,0534	0,0467
Mínimo	0,323	0,323
Máximo	0,459	0,450
Rango	0,136	0,128
Coefficiente de Asimetría	0,3549	0,9502
Coefficiente de Curtosis	-0,6997	1,9295

En cuanto al análisis estadístico se obtiene:

Tabla 54. Análisis estadístico relación resistencia a tracción indirecta – densidad a 90 días

R. TRACCIÓN INDIRECTA – DENSIDAD 90 d	
Coefficiente de correlación	0,9179
R <sup>2</sup>	0,8513
Error estándar de la estimación	0,0213
Error promedio	0,0150
Estadístico Durbin-Watson	1,4448 (P=0,3410)

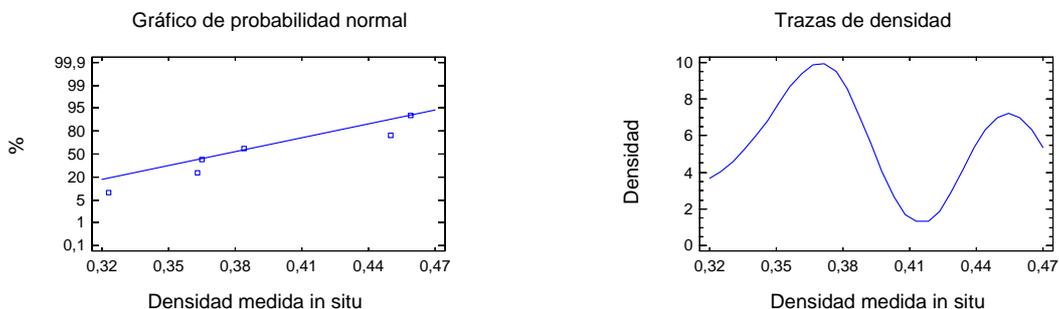


Figura 43. Comparación de resistencia a tracción indirecta a 90 días con una distribución normal

La evolución de las resistencias medias con la edad de las probetas (7, 28 y 90 días) se representa en la gráfica siguiente. La curva tiende a la horizontal algo menos que en el caso de resistencia a compresión, pero llega a explicar un 78,50% de la variabilidad de la resistencia a tracción indirecta.

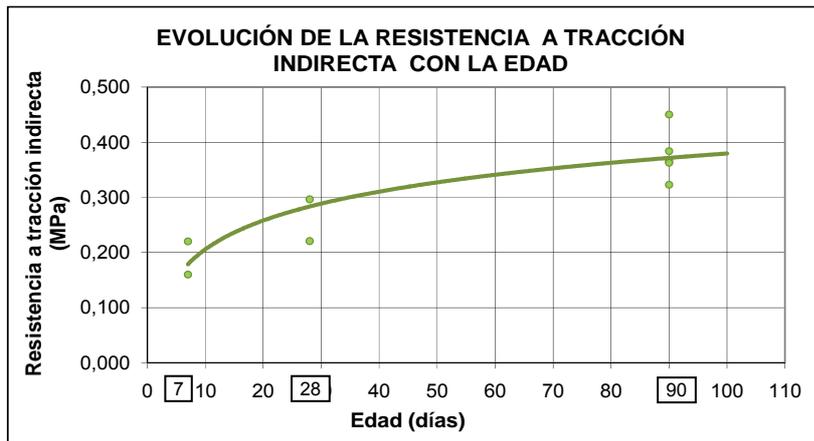


Figura 44. Evolución de resistencias a tracción indirecta en probeta cilíndrica 15,24 x 17,78 cm

Tabla 55. Incremento de resistencias a tracción indirecta con la edad en probeta cilíndrica

7 días	28 días	90 días	$\Delta$ 7-28 días	$\Delta$ 28-90 días	$\Delta$ 7-90 días
0,19	0,26	0,39	36,84%	50,00%	105,26%

La resistencia a tracción indirecta a largo plazo es algo superior a dos veces la resistencia obtenida a tracción indirecta a 7 días. Se puede establecer la relación:

$$R_{ti,90d} = 2 R_{ti,7d}$$

$$R_{ti,28d} = 1,5 R_{ti,7d}$$

### 6.2.3. Relación compresión – tracción indirecta

Las relaciones entre la resistencia a compresión y tracción indirecta y las variaciones de resistencia con la edad de las probetas, se muestran en las tablas siguientes:

Tabla 56. Relación resistencia compresión – tracción indirecta en probeta cilíndrica

RELACIÓN RESISTENCIA A COMPRESIÓN-TRACCIÓN INDIRECTA					
Edad de las probetas (días)	Resistencia a compresión		Resistencia a tracción indirecta		Rti / Rc
	R media (MPa)	Nº probetas	R media (MPa)	Nº Probetas	
7	2,617	6	0,190	2	0,073
28	3,168	3	0,259	2	0,082
90	3,960	8	0,391	6	0,099

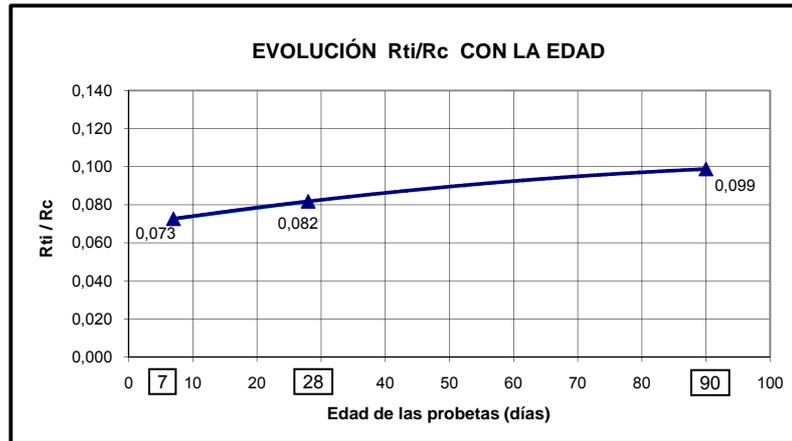


Figura 45. Evolución de la relación resistencia compresión – tracción indirecta

La resistencia a compresión a largo plazo del material reciclado es diez veces la resistencia a tracción del material (relación que coincide con la publicada en el Manual de firmes con capas tratadas con cemento<sup>(18)</sup> del CEDEX – IECA):

$$R_{c,90d} = 10 R_{ti,90d}$$

o lo que es lo mismo:

$$R_{ti,90d} = 0,1 R_{c,90d}$$

y como la resistencia a compresión a largo plazo es 1,5 veces la medida en obra a 7 días, se obtiene que la resistencia a tracción indirecta que el material alcanza es:

$$R_{ti,LP} = 0,15 R_{c,7d}$$

La relación  $R_{ti}/R_c$  aumenta con la edad de las probetas, es decir la resistencia a tracción indirecta aumenta algo más rápido que la resistencia a compresión. Este fenómeno se refleja en el siguiente cuadro de valores medios y la figura que represente las curvas de tendencia.

Tabla 57. Porcentaje de aumento de la resistencia con la edad

AUMENTO PORCENTUAL DE RESISTENCIA CON LA EDAD			
Edad/Ensayo	7-28	28-90	7-90
Compresión	20,99%	24,92%	51,15%
Tracción indirecta	36,84%	50,00%	105,26%
$R_{ti}/R_c$	0,073	0,082	0,099

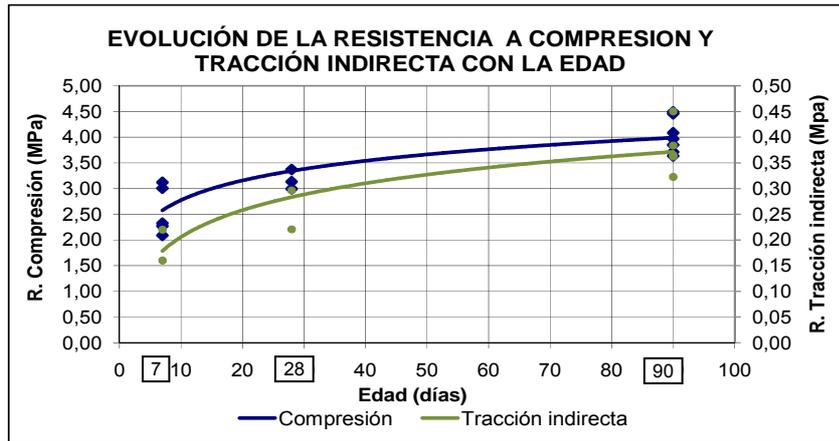


Figura 46. Evolución de la resistencia a compresión y tracción indirecta con la edad

### 6.3. PROBETAS PRISMÁTICAS. ENSAYOS ESTÁTICOS

A la vez que se realizan los ensayos con las probetas cilíndricas, se inicia la fabricación de las probetas prismáticas de dimensiones 15 x 15 x 60 cm. Una vez que estas probetas se rompen a flexotracción, se ensayan también las dos mitades obtenidas de cada probeta, una a compresión simple y la otra mitad a tracción indirecta.

Además de las 14 probetas confeccionadas para definir el protocolo de fabricación, la primera etapa de la investigación comprende 22 probetas para ensayar de forma estática a flexotracción y 22 para ensayar de forma dinámica (fatiga).

Posteriormente, en la segunda fase se fabrican otras 48 probetas prismáticas, ensayándose 15 en carga estática a flexotracción y 33 en carga dinámica a fatiga. En todos los casos, las dos mitades se rompen a compresión simple y a tracción indirecta en otras prensas. A continuación se analizan los resultados.

#### 6.3.1. Ensayos de rotura a flexotracción

En las tablas A2.15 y A2.16 del anejo 2 se muestran todos los resultados obtenidos de rotura a flexotracción de las probetas ensayadas diferenciados por fases o etapas, de las que se incluye un cuadro resumen a continuación:

Tablas 58 y 59. Resultados de resistencia a flexotracción en probeta prismática a diferentes edades

1ª FASE (AÑOS 2007 - 2008)					
Probeta nº	Densidad seca ds=s/v (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad Media (g/cm <sup>3</sup> )	Días de curado	Resistencia a flexotracción (MPa)	Resistencia media a flexotracción (MPa)
EA4.1	2,076	2,091	7	0,533	0,452
EA5.1	2,080		7	0,458	
EA6.1	2,042		7	0,445	
EA7.1	2,124		7	0,388	
EA8.1	2,094		7	0,466	
EA9.1	2,130		7	0,421	
EA1.1	2,101	2,104	28	0,561	0,535
EA1.2	2,106		28	0,578	
EA2.1	2,108		28	0,468	
EA2.2	2,125		28	0,576	
EA3.1	2,099		28	0,537	
EA3.2	2,084		28	0,490	
EA4.2	2,109	2,114	90	0,806	0,693
EA5.2	2,108		90	0,598	
EA6.2	2,075		90	0,580	
EA7.2	2,128		90	0,775	
EA8.2	2,124		90	0,787	
EA9.2	2,139		90	0,610	

2ª FASE (AÑOS 2009 - 2010)					
Probeta nº	Densidad seca ds=s/v (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad Media (g/cm <sup>3</sup> )	Días de curado	Resistencia a flexotracción (MPa)	Resistencia media a flexotracción (MPa)
FG6.1	2,091	2,102	79	0,538	0,587
FG6.3	2,079		80	0,667	
FG6.5	2,137		84	0,556	
FG11.1	2,189	2,106	93	0,501	0,363
FG6.8	2,054		100	0,221	
FG5.1	2,075		104	0,366	
FG10.1	2,051	2,083	119	0,561	0,521 (0,544)*
FG6.10	2,113		126	0,638	
FG10.4	2,066		127	0,516	
FG6.11	2,148		132	0,461 <sup>(**)</sup>	
FG6.12	2,035		132	0,427	
FG10.6	2,174	2,126	139	0,667	0,591 (0,633)*
FG9.1	2,138		145	0,673	
FG9.4	2,104		145	0,609	
FG8.2	2,161		146	0,585	
FG7.2	2,051		147	0,420	
FG4.1	2,065	2,078	435	0,361	0,437
FG4.2	2,086		435	0,350	
FG4.4	2,083		436	0,599	

\* eliminando el peor resultado

\*\* esta probeta se ensayó primero a fatiga sin que se fisurara o rompiera aparentemente

Como se aprecia en la figura siguiente, no existe una relación estadísticamente significativa entre la resistencia a flexotracción a 7 días y la densidad, ya que la probeta rompe por la sección más débil que se encuentre en la zona comprendida entre los rodillos superiores que están separados 15 cm.

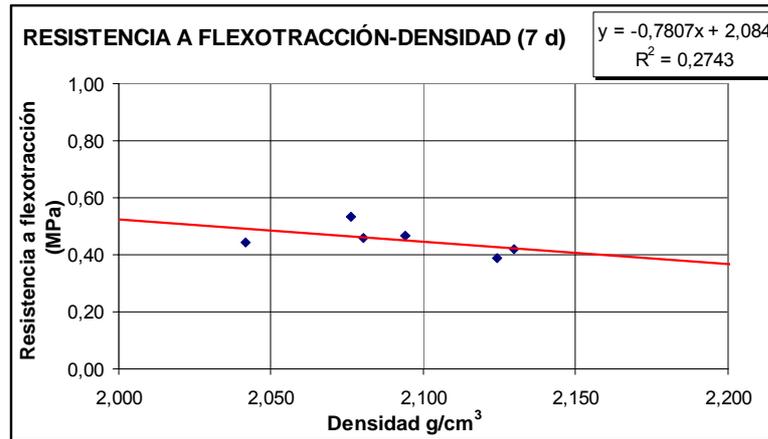


Figura 47. Relación densidad – resistencia a flexotracción en probeta prismática a 7 días

El análisis estadístico de los valores obtenidos de resistencia a flexotracción y la relación con la densidad se incluye en las siguientes tablas:

Tabla 60. Análisis estadístico de la resistencia a flexotracción a 7 días

FLEXOTRACCIÓN 7 DÍAS	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	6
Media	0,4518
Varianza	0,0024
Desviación estándar	0,0488
Mínimo	0,388
Máximo	0,533
Rango	0,145
Coefficiente de Asimetría	0,6411
Coefficiente de Curtosis	0,6420

Tabla 61. Análisis estadístico relación resistencia flexotracción – densidad a 7 días

R. FLEXOTRACCIÓN – DENSIDAD 7 DÍAS	
Coefficiente de correlación	- 0,5277
R <sup>2</sup>	0,2743
Error estándar de la estimación	0,0463
Error promedio	0,0286
Estadístico Durbin-Watson	1,1995 (P=0,0415)

Se muestran a continuación las gráficas de aproximación a la distribución normal para las probetas de 7 días.

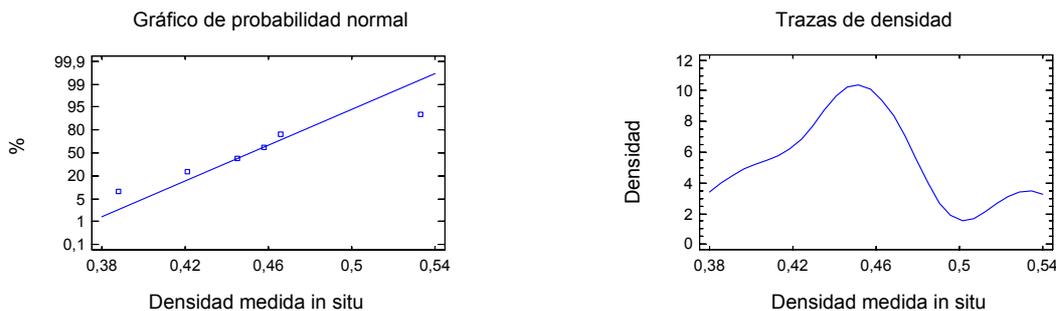


Figura 48. Comparación de resistencias a flexotracción a 7 días con una distribución normal

De manera similar tampoco se observa una relación directa clara a 28 días entre la resistencia a flexotracción de la probeta prismática y la densidad de la misma, aunque se puede apreciar cierta tendencia a mejorar una con otra.

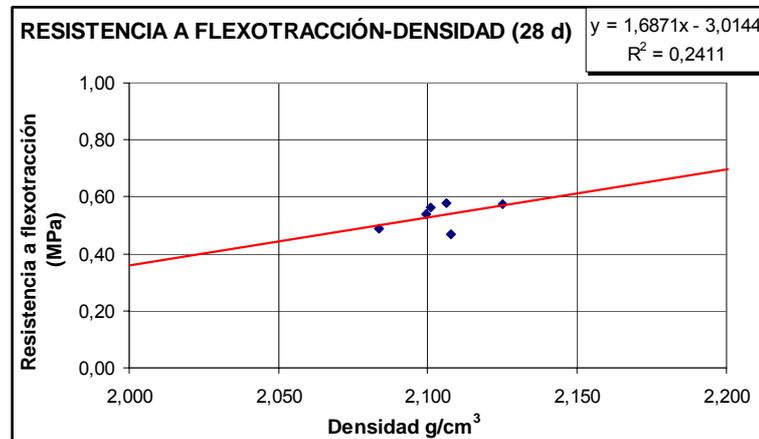


Figura 49. Relación densidad – resistencia a flexotracción en probeta prismática a 28 días

Tabla 62. Análisis estadístico de la resistencia a flexotracción a 28 días

FLEXOTRACCIÓN 28 DÍAS	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	6
Media	0,535
Varianza	0,0021
Desviación estándar	0,0463
Mínimo	0,468
Máximo	0,578
Rango	0,110
Coficiente de Asimetría	-0,6822
Coficiente de Curtosis	-0,7699

Es reseñable el hecho de que la varianza de los datos disminuya con la edad de las probetas, como ya sucedió en los ensayos de compresión sobre probetas cilíndricas. Esto se debe a la mayor responsabilidad de la parte cementante en la obtención de resistencias a mayor edad.

Las gráficas de aproximación a la distribución normal para las probetas de 28 días son:

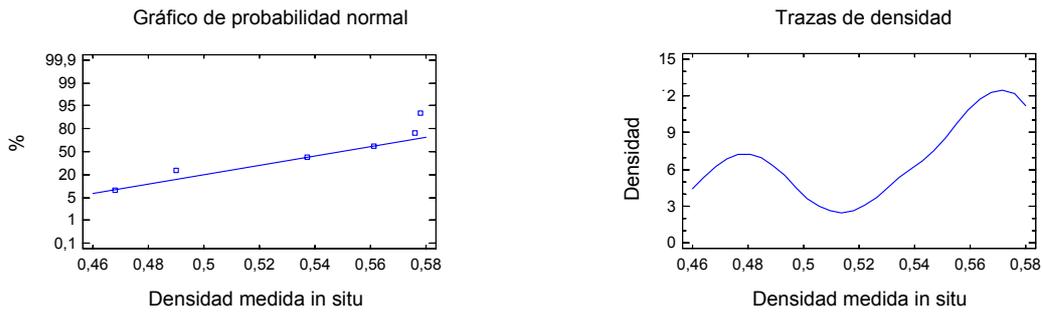


Figura 50. Comparación de resistencias a flexotracción a 28 días con una distribución normal

A continuación se incluyen las gráficas densidad – resistencia a flexotracción para edades mayores, diferenciándose entre las 6 probetas ensayadas a 90 días y las 25 probetas ensayadas a largo plazo (entre 80 y 145 días aunque hay 3 que se rompieron a 435 días resultando resistencias inferiores). Como puede apreciarse se produce cierta tendencia a mejorar la resistencia con el incremento de densidad, pero no existe una relación clara a pesar de tratarse de una muestra más amplia.

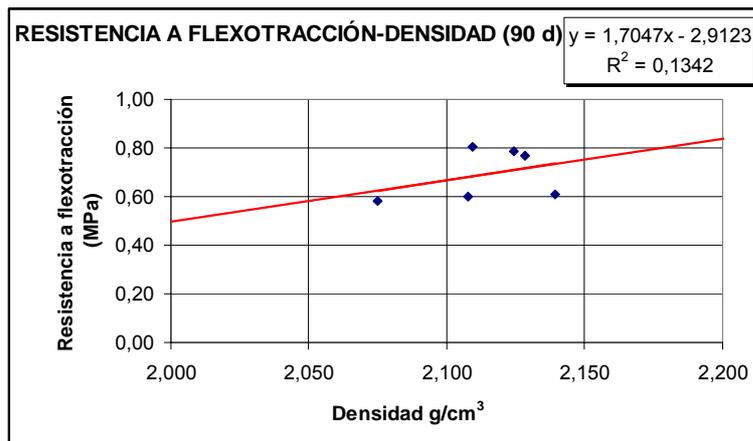


Figura 51. Relación densidad – resistencia a flexotracción en probeta prismática a 90 días

En este caso, la relación resistencia a flexotracción – densidad a la edad de 90 días se asemeja mucho a la obtenida a 28 días con una recta de tendencia del tipo:

$$R_f = 1,7 d - 3,0$$

Ahora bien, como se ve en el análisis estadístico posterior, con los datos disponibles, no se puede establecer una relación estadísticamente significativa entre la resistencia a flexotracción a 90 días o a largo plazo y la densidad de las probetas.

Tabla 63. Análisis estadístico de resistencia a flexotracción a 90 días

FLEXOTRACCIÓN 90 DÍAS	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	6
Media	0,6913
Varianza	0,0111
Desviación estándar	0,1054
Mínimo	0,580
Máximo	0,806
Rango	0,225
Coefficiente de Asimetría	0,0246
Coefficiente de Curtosis	-3,0735

Tabla 64. Análisis estadístico relación resistencia flexotracción – densidad a 90 días

R. FLEXOTRACCIÓN – DENSIDAD 90 DÍAS	
Coefficiente de correlación	0,3643
R <sup>2</sup>	0,1342
Error estándar de la estimación	0,1098
Error promedio	0,0840
Estadístico Durbin-Watson	1,9693 (P=0,4161)

La representación gráfica densidad – resistencia a flexotracción a largo plazo resulta:

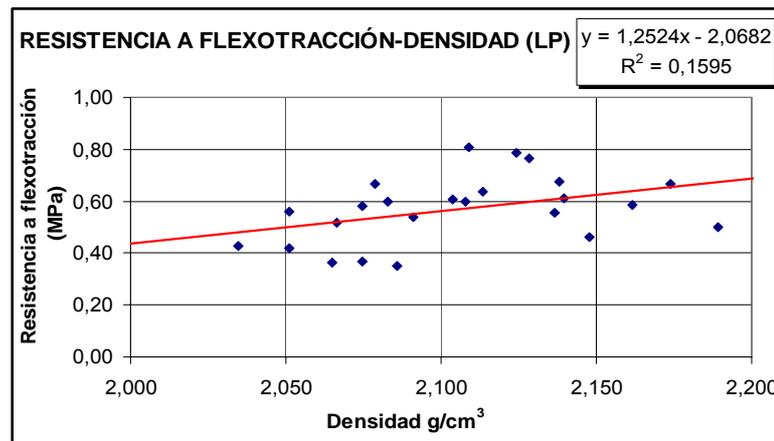


Figura 52. Relación densidad – resistencia a flexotracción en probeta prismática a largo plazo

En el estudio se ha suprimido la probeta FG6.8 por el reducido valor de resistencia obtenido (0,221 MPa) que indica cierto defecto, como algún hueco en su interior. El correspondiente análisis estadístico de resistencias a flexotracción a largo plazo arroja los siguientes valores (24 probetas de las 25 ensayadas):

Tabla 65. Análisis estadístico de resistencia a flexotracción a largo plazo

FLEXOTRACCIÓN LARGO PLAZO	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	24
Media	0,5686
Varianza	0,0164
Desviación estándar	0,1282
Mínimo	0,350
Máximo	0,806
Rango	0,456
Coefficiente de Asimetría	-0,0059
Coefficiente de Curtosis	-0,4681

Tabla 66. Análisis estadístico relación resistencia flexotracción – densidad a largo plazo

R. FLEXOTRACCIÓN – DENSIDAD LARGO PLAZO	
Coefficiente de correlación	0,3975
R <sup>2</sup>	0,1595
Error estándar de la estimación	0,1202
Error promedio	0,0919
Estadístico Durbin-Watson	1,3853 (P=0,0542)

La gran dispersión que introducen los nuevos valores obtenidos con material reciclado de características tan diferentes y no tan homogéneas como en los casos anteriores, hace que la recta de tendencia no coincida con aquellas, pasando a ser de la forma:

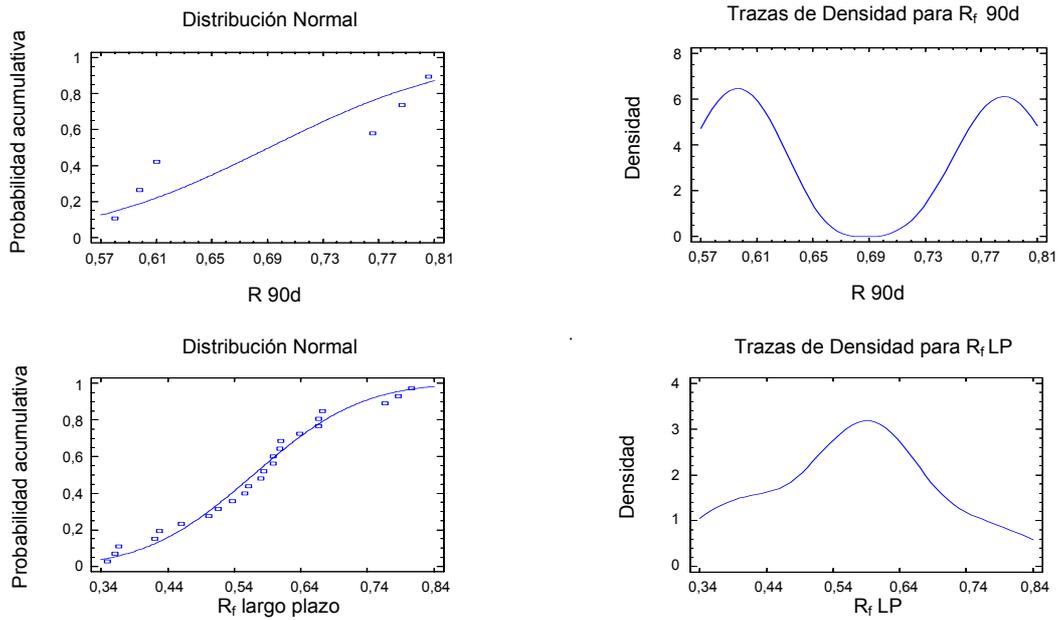
$$R_f = 1,25 d - 2,07$$

Es decir, cuando las características del material reciclado se mantienen relativamente uniformes (al menos en cuanto al espesor de cada capa, tipo de material y porcentaje de finos) se pueden obtener ecuaciones lineales de relación entre los diferentes parámetros (resistencia a flexotracción, compresión, tracción, densidad, etc), pero estas relaciones se alteran cuando las características del reciclado varían (sobre todo con diferentes espesores de capa bituminosa y con el porcentaje de finos bituminosos).

La varianza en este caso no disminuye con la edad de las probetas respecto a los resultados de 7 y 28 días, y aunque la asimetría es muy baja (buena simetría), el coeficiente de Curtosis es alto, reduciéndose considerablemente ambos valores cuando se incluye toda la muestra (24 probetas rotas a diferentes edades comprendidas entre 80 y 435 días al haberse suprimido la probeta FG6.8).

Si se considera esta probeta FG6.8 de 0,221 MPa la varianza se incrementa a 0,0206, el rango a 0,585 y los coeficientes de asimetría y Curtosis a -0,3306 y -0,0032 respectivamente.

Las gráficas de aproximación a una distribución normal para 90 días y largo plazo resultan:



Figuras 53 y 54. Comparación de resistencias a flexotracción a 90 días y largo plazo con una distribución normal

En la siguiente tabla y gráfica, o con mayor detalle en las columnas de peso a diferentes edades que figuran en la tabla A2.13 del anejo 2, se puede apreciar que las probetas prismáticas pierden peso con el tiempo dentro de la cámara de curado, reduciéndose ligeramente la densidad de las mismas (igual que sucedía con las cilíndricas puesto que existe una traslación de la humedad del interior de la probeta hacia el exterior con posterior pérdida, lógicamente muy inferior a la que se produciría si no estuviera en ambiente saturado). Esta densidad una vez fraguado el material, no hay que confundirla con la densidad seca, que evidentemente es inferior. Por su interés se incluyen los resultados:

Tabla 67. Densidades de las probetas prismáticas al fabricarlas y antes de su ensayo

Probeta nº	Días de curado	En fabricación			Antes de la rotura		% Pérdida densidad (humedad)
		Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	% Densidad Proctor	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	% Densidad Proctor	
EA1.1	28	2,261	2,101	100,04	2,221	105,75	1,01%
EA1.2	28	2,267	2,106	100,30	2,237	106,53	0,84%
EA2.1	28	2,268	2,108	100,37	2,244	106,88	0,99%
EA2.2	28	2,287	2,125	101,19	2,270	108,08	0,84%
EA3.1	28	2,259	2,099	99,98	2,221	105,75	1,96%
EA3.2	28	2,242	2,084	99,22	2,221	105,75	1,76%
EA4.1	7	2,234	2,076	98,86	2,210	105,26	1,92%
EA5.1	7	2,239	2,080	99,06	2,222	105,82	0,97%
EA6.1	7	2,197	2,042	97,22	2,175	103,56	0,91%
EA7.1	7	2,286	2,124	101,16	2,267	107,94	0,51%
EA8.1	7	2,253	2,094	99,71	2,231	106,24	0,47%
EA9.1	7	2,292	2,130	101,42	2,273	108,22	0,46%
EA4.2	90	2,270	2,109	100,43	2,225	105,96	0,46%

Probeta n°	Días de curado	En fabricación			Antes de la rotura		% Pérdida densidad (humedad)
		Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	% Densidad Proctor	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	% Densidad Proctor	
EA5.2	90	2,268	2,108	100,37	2,228	106,10	4,98%
EA6.2	90	2,233	2,075	98,80	2,190	104,27	3,98%
EA7.2	90	2,290	2,128	101,35	2,268	108,01	1,16%
EA8.2	90	2,286	2,124	101,16	2,265	107,87	1,68%
EA9.2	90	2,302	2,139	101,88	2,290	109,07	2,21%
FG4.1	435	2,222	2,065	98,34	2,212	105,33	7,72%
FG4.2	435	2,244	2,086	99,32	2,234	106,38	6,60%
FG4.4	436	2,241	2,083	99,19	2,231	106,24	6,33%
FG5.1	104	2,233	2,075	98,80	2,121	101,02	4,83%
FG6.1	79	2,250	2,091	99,58	2,161	102,89	3,85%
FG6.3	80	2,237	2,079	98,99	2,211	105,29	3,73%
FG6.5	84	2,299	2,137	101,75	2,261	107,65	3,93%
FG6.8	100	2,210	2,054	97,81	2,161	102,93	3,42%
FG6.10	126	2,274	2,113	100,63	2,099	99,93	2,66%
FG6.11	132	2,311	2,148	102,27	2,159	102,79	2,53%
FG6.12	132	2,190	2,035	96,89	2,051	97,67	4,08%
FG7.2	147	2,207	2,051	97,68	2,101	100,04	2,33%
FG8.2	146	2,326	2,161	102,93	2,236	106,49	1,01%
FG9.1	145	2,301	2,138	101,81	2,215	105,47	0,84%
FG9.4	145	2,264	2,104	100,17	2,175	103,56	0,99%
FG10.1	119	2,207	2,051	97,68	2,132	101,52	0,84%
FG10.4	127	2,224	2,066	98,40	2,164	103,07	1,96%
FG10.6	139	2,339	2,174	103,52	2,280	108,57	1,76%
FG11.1	93	2,356	2,189	104,24	2,259	107,59	1,92%
MEDIA		2,261	2,101	100,07	2,209	105,17%	0,97%

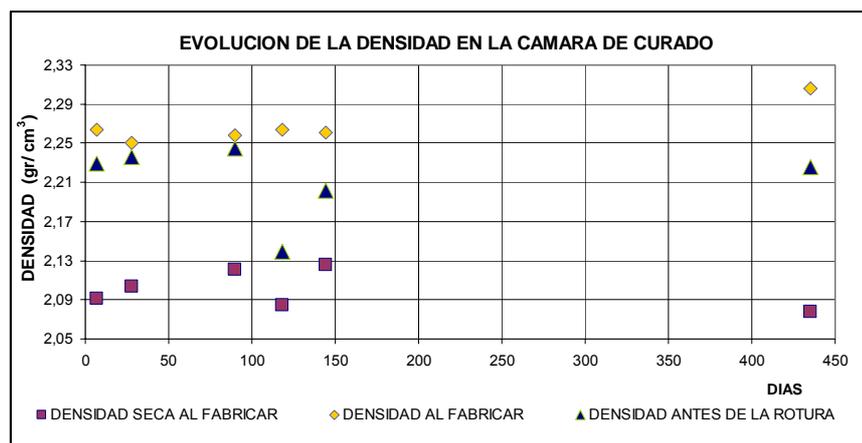


Figura 55. Valores medios de densidad a diferentes edades de las probetas prismáticas en fabricación y rotura

Si se intenta relacionar la densidad de las probetas en su fabricación y antes del ensayo, para definir la pérdida de humedad, es difícil buscar una ecuación de modelo ajustado que resulte válida por la diferente edad a la que se ensayan. Lógicamente la pérdida de

humedad es mayor a edades tempranas, tendiendo a uniformizarse. No obstante, sin considerar la variable tiempo de estancia en la cámara de curado, la relación sería de tipo lineal con la siguiente ecuación del modelo ajustado:

$$D \text{ rotura} = 0,9263 \cdot D \text{ fabricación} + 0,1141$$

Existe relación estadísticamente significativa entre la densidad de rotura y la densidad de fabricación para un nivel de confianza del 99%. El estadístico  $R^2$  indica que el modelo explica un 41,7955 % de la variabilidad en la densidad de rotura. El coeficiente de correlación es igual a 0,6465, lo que indica una relación moderadamente fuerte entre las variables. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 0,0436183. El error absoluto medio de 0,0345 es el valor medio de los residuos.

A continuación se estudia la evolución de la resistencia a flexotracción con la edad de las probetas y los porcentajes de incremento con la edad. En la representación gráfica se incluyen los valores medios y la curva de tendencia que tiene expresión potencial, con un valor de  $R^2 = 0,697$ .

Tabla 68. Incremento de resistencia a flexotracción con la edad de las probetas prismáticas

7 días	28 días	90 días	$\Delta$ 7-28 días	$\Delta$ 28-90 días	$\Delta$ 7-90 días
0,452	0,535	0,693	18,36%	29,16%	52,88%

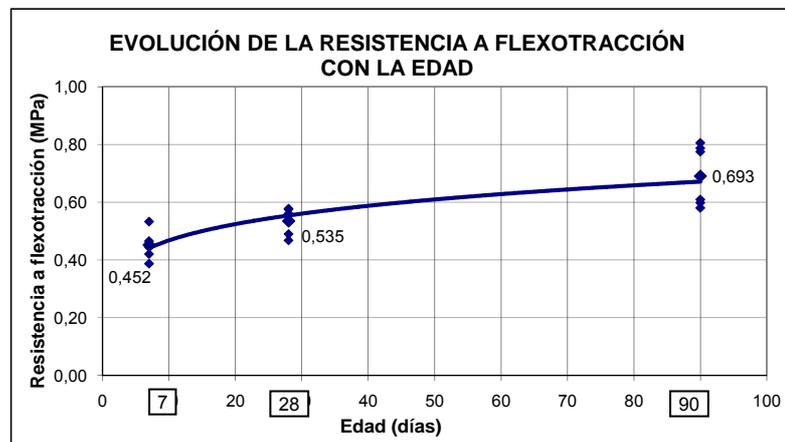


Figura 56. Evolución de la resistencia a flexotracción con la edad de las probetas prismáticas

Es decir, se puede afirmar que la resistencia a flexotracción a noventa días del material reciclado es aproximadamente 1,5 veces la resistencia media a 7 días, con cierto margen de seguridad:

$$R_{f,90d} = 1,5 R_{f,7d}$$

Considerando que sólo se dispone de datos de resistencia a 7 y 28 días en la primera fase de la investigación, nada más se han incluido los datos de resistencia de este primer período (años 2007 – 2008).

Se aprecia claramente que en esta primera etapa de los trabajos, en la que se fabricaron las 18 probetas en tres días prácticamente consecutivos, la homogeneidad del material es mayor y los resultados son más lógicos. Las densidades se incrementan con el tiempo y la resistencia también.

Sin embargo en las probetas realizadas en la segunda fase, los resultados obtenidos son en general inferiores, tanto de densidades como de resistencias, a pesar de ensayarse las probetas a mayor edad. Esta dispersión se debe a la variabilidad que las características del material introduce en todos los reciclados. A medida que el material contiene más finos, cambia su estructura granular o aumenta el contenido de betún residual (sobre todo en los finos con película bituminosa), las resistencias obtenidas a flexotracción pueden resultar inferiores. Esta bajada de resistencia no se debe confundir con una peor calidad o un peor comportamiento, puesto que el módulo de elasticidad también disminuye y la capa reciclada comparte la capacidad de soporte de las cargas en mayor porcentaje con las otras capas, en vez de asumir casi toda la responsabilidad estructural ella sola, lo que en muchas ocasiones supone un mejor comportamiento (el material es menos rígido y absorbe mejor todas las deformaciones).

### **6.3.2. Ensayos de rotura a compresión de las medias probetas ensayadas a flexotracción**

Una de las dos mitades que se obtiene de las probetas prismáticas ensayadas a flexotracción se rompe a compresión simple. En este caso, a cada probeta X ensayada a compresión se le denomina Xa. Los resultados se incluyen en la tabla A2.17 del anejo 2, exponiendo a continuación un resumen de los mismos:

Tablas 69 y 70. Resistencia a compresión de las medias probetas obtenidas de la rotura a flexotracción

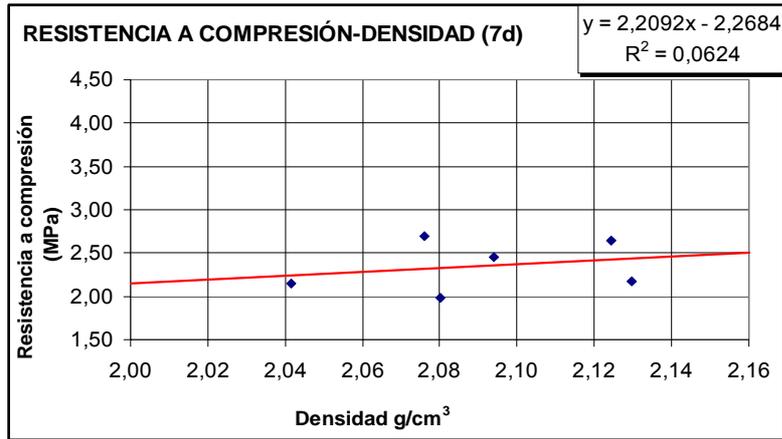
1ª FASE (AÑOS 2007 - 2008)						
Probeta nº	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad Media (g/cm <sup>3</sup> )	Días de curado	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia media a compresión (MPa)	
EA4.1.a	2,076	2,091	7	2,694	2,351	
EA5.1.a	2,080		7	1,983		
EA6.1.a	2,042		7	2,154		
EA7.1.a	2,124		7	2,648		
EA8.1.a	2,094		7	2,454		
EA9.1.a	2,130		7	2,174		
EA1.1.a	2,101	2,104	28	3,442	3,309	
EA1.2.a	2,106		28	3,594		
EA2.1.a	2,108		28	3,381		
EA2.2.a	2,125		28	3,444		
EA3.1.a	2,099		28	2,990		
EA3.2.a	2,084		28	3,002		
EA4.2.a	2,109	2,114	90	3,766	3,526	
EA5.2.a	2,108		90	3,344		
EA6.2.a	2,075		90	3,203		
EA7.2.a	2,128		90	3,947		
EA8.2.a	2,124		90	3,580		
EA9.2.a	2,139		90	3,317		

2ª FASE (AÑOS 2009 - 2010)						
Probeta nº	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad media (g/cm <sup>3</sup> )	Días de curado	Edad Media	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia media a compresión (MPa)
FG6.1.a	2,091	2,102	80	82	4,199	4,152 3,735 **
FG6.3a	2,079		83		4,340	
FG6.5a	2,137		84		3,918	
FG5.1a	2,075	2,106	104	106	2,169	2,694
FG11.1a	2,189		106		3,600	
FG6.8a	2,054		107		2,313	
FG10.1a	2,051	2,101	119	130	3,663	3,893
FG6.10a	2,113		129		3,827	
FG10.4a	2,066		131		3,660	
FG10.6a	2,174		139		4,423	
FG9.1a	2,138	2,106	172	175	4,651	4,102 4,807 *
FG9.4a	2,104		172		4,559	
FG8.2a	2,161		173		5,103	
FG7.2a	2,051		174		2,465	
FG6.11a	2,148		181		4,914	
FG6.12a	2,035		181		2,919	
FG4.1.a	2,065	2,078	492	492	2,273	2,939 3,272 *
FG4.2.a	2,086		492		2,896	
FG4.4.a	2,083		492		3,649	

\* eliminando el peor valor

\*\* valor medio considerando resultados 1ª y 2ª fase

Analizando gráficamente la relación entre la densidad y la resistencia a compresión a diferentes edades se observa que a 7 días hay una gran dispersión en los resultados debido al hecho de que la densidad se calcula en toda la probeta y puede no corresponder con la mitad que se ensaya (cuya longitud varía entre 30 y 36 cm según incluye en la tabla A2.17 del anejo 2), mientras que la zona de probeta a ensayar es únicamente un cubo de 15 x 15 x 15 cm. A 28 días se observa también cierta relación entre las variables con menor dispersión de los puntos:



Figuras 57. Relación densidad – resistencia compresión en medias probetas obtenidas de la rotura a flexotracción a 7 días.

Tabla 71. Análisis estadístico de resistencia a compresión de las mitades obtenidas de la rotura a flexotracción a 7 días

COMPRESIÓN MITAD FLEX 7 DÍAS	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	6
Media	2,3511
Varianza	0,0844
Desviación estándar	0,2905
Mínimo	1,983
Máximo	2,694
Rango	0,711
Coficiente de Asimetría	0,0539
Coficiente de Curtosis	-1,0342

Tabla 72. Análisis estadístico relación R<sub>c</sub> semiprismas – densidad a 7 días

R. COMPRESIÓN SEMIPRISMAS – DENSIDAD 7 DÍAS	
Coficiente de correlación	0,2472
R <sup>2</sup>	0,0624
Error estándar de la estimación	0,3147
Error promedio	0,2321
Estadístico Durbin-Watson	2,0865 (P=0,4167)

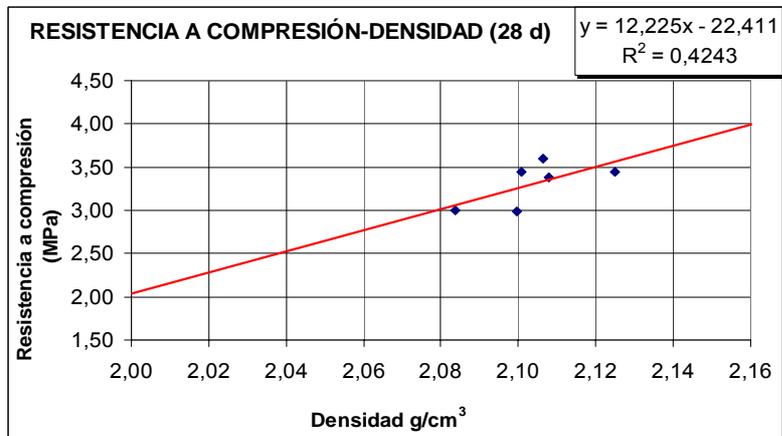


Figura 58. Relación densidad – resistencia compresión en medias probetas prismáticas obtenidas de la rotura a flexotracción a 28 días.

Tabla 73. Análisis estadístico de resistencia a compresión de las mitades obtenidas de la rotura a flexotracción a 28 días

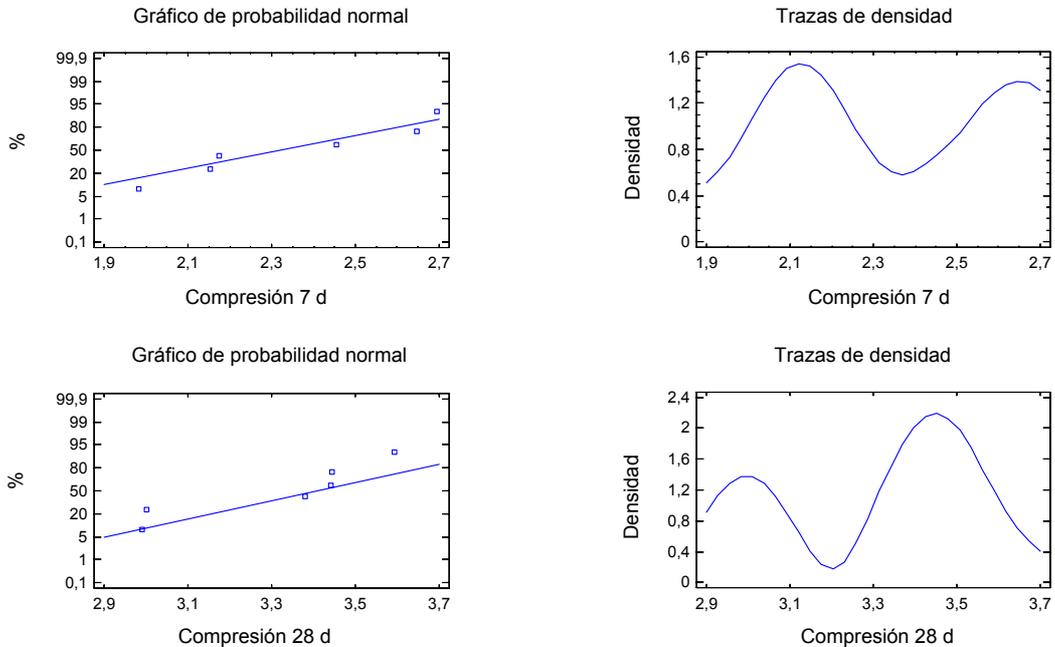
COMPRESIÓN MITAD FLEX 28 DÍAS	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	6
Media	3,3088
Varianza	0,0637
Desviación estándar	0,2523
Mínimo	2,99
Máximo	3,594
Rango	0,604
Coefficiente de Asimetría	-0,6144
Coefficiente de Curtosis	-0,8381

Tabla 74. Análisis estadístico relación  $R_c$  semiprismas – densidad a 28 días

R. COMPRESIÓN SEMIPRISMAS – DENSIDAD 28 DÍAS	
Coefficiente de correlación	0,6535
$R^2$	0,4243
Error estándar de la estimación	0,2135
Error promedio	0,1491
Estadístico Durbin-Watson	0,7823 (P=0,0217)

Es reseñable el hecho de que la varianza de los datos disminuya con la edad de las probetas, como ya sucedió en los ensayos de compresión sobre probetas cilíndricas.

Se muestran a continuación las gráficas de aproximación a la distribución normal para las probetas de 7 y 28 días.



Figuras 59 y 60. Comparación de resistencias a compresión de medias probetas a 7 y 28 días con una distribución normal

De manera similar para las mitades rotas a 90 días se obtienen las gráficas y parámetros siguientes:

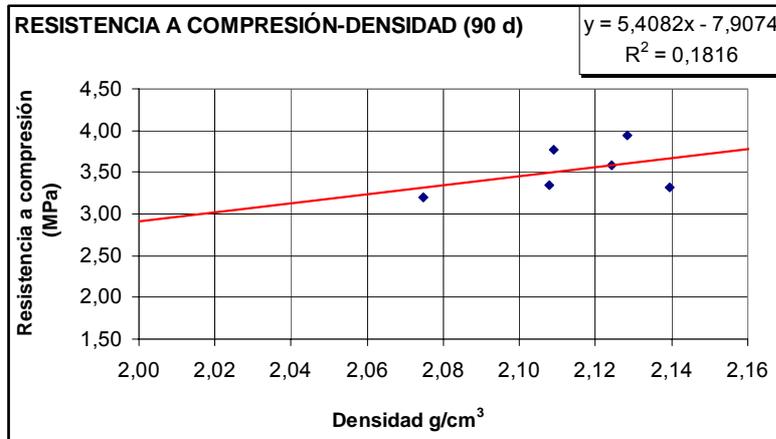


Figura 61. Relación densidad – resistencia compresión en medias probetas obtenidas de la rotura a flexotracción a 90 días.

Tabla 75. Análisis estadístico de resistencia a compresión de las mitades obtenidas de la rotura a flexotracción a 90 días

COMPRESIÓN MITAD FLEX 90 DÍAS	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	6
Media	3,5252
Varianza	0,0826
Desviación estándar	0,2875
Mínimo	3,203
Máximo	3,940
Rango	0,737
Coficiente de Asimetría	0,4689
Coficiente de Curtosis	-1,4606

Tabla 76. Análisis estadístico relación  $R_c$  semiprismas – densidad a 90 días

R. COMPRESIÓN SEMIPRISMAS – DENSIDAD 90 DÍAS	
Coficiente de correlación	0,4232
$R^2$	0,1816
Error estándar de la estimación	0,2912
Error promedio	0,2018
Estadístico Durbin-Watson	1,7974 (P=0,3044)

Y a largo plazo, es decir las probetas rotas a 90 días en la primera fase más las rotas en la segunda fase a diferentes edades, la gráfica y parámetros estadísticos que se obtienen del correspondiente análisis resultan:

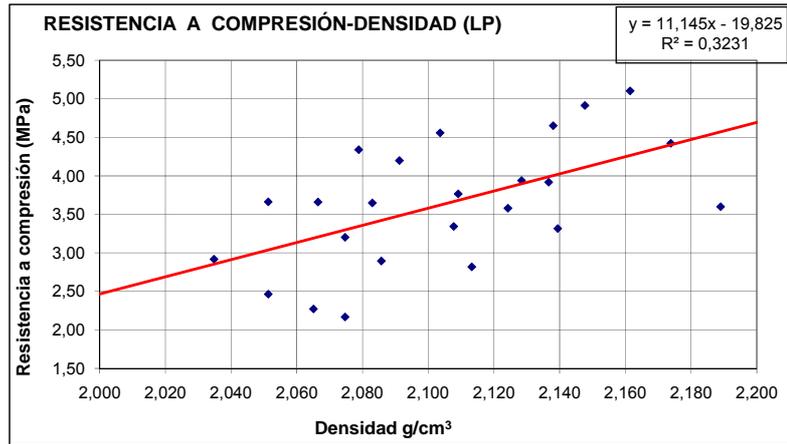


Figura 62. Relación densidad – resistencia compresión en medias probetas obtenidas de la rotura a flexotracción a largo plazo.

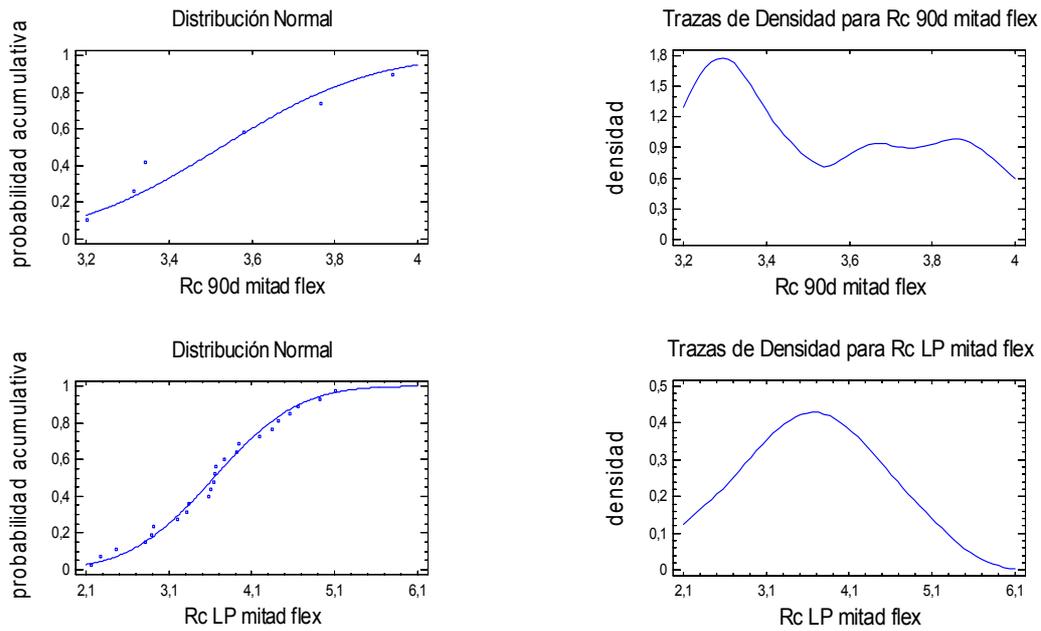
Tabla 77. Análisis estadístico de resistencia a compresión de las mitades obtenidas de la rotura a flexotracción a largo plazo

COMPRESIÓN MITAD FLEX LARGO PLAZO	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	24
Media	3,6404
Varianza	0,6425
Desviación estándar	0,8016
Mínimo	2,169
Máximo	5,103
Rango	2,934
Coficiente de Asimetría	-0,0745
Coficiente de Curtosis	-0,5803

Tabla 78. Análisis estadístico relación  $R_c$  semiprismas – densidad a largo plazo

R. COMPRESIÓN SEMIPRISMAS – DENSIDAD LARGO PLAZO	
Coficiente de correlación	0,5684
$R^2$	0,3231
Error estándar de la estimación	0,6743
Error promedio	0,5410
Estadístico Durbin-Watson	1,5865 (P=0,1391)

Las gráficas de aproximación a la distribución normal para las probetas de 90 días y largo plazo resultan:



Figuras 63 y 64. Comparación de resistencias obtenidas a compresión de mitades ensayadas previamente a flexotracción a 90 días y largo plazo con una distribución normal

La evolución de la resistencia a compresión de las medias probetas obtenidas de la rotura previa a flexotracción es:

Tabla 79. Incremento de la resistencia a compresión de las medias probetas con la edad

7 días	28 días	90 días	Largo plazo	$\Delta$ 7-28 días	$\Delta$ 28-90 días	$\Delta$ 7-90 días	$\Delta$ 7-L.P.
2,351	3,309	3,735 <sup>(a)</sup>	4,807 <sup>(b)</sup> 4,295 <sup>(c)</sup>	40,75%	12,87 %	58,87 %	104,47 % <sup>(b)</sup> 82,69 % <sup>(c)</sup>

<sup>(a)</sup> se incluyen todos los resultados a 90 días de la 1ª y 2ª fase. En 1ª fase se obtiene 3,526 MPa

<sup>(b)</sup> valor medio eliminando el peor valor sin considerar resultados a 492 días

<sup>(c)</sup> valor medio eliminando el peor valor incluyendo resultados a 492 días

Cuya representación gráfica resulta más clara, diferenciándose dos extremos según se consideren o no los resultados de resistencia a compresión obtenidos en las medias probetas ensayadas a flexotracción a 492 días, cuyos valores pueden considerarse reducidos:

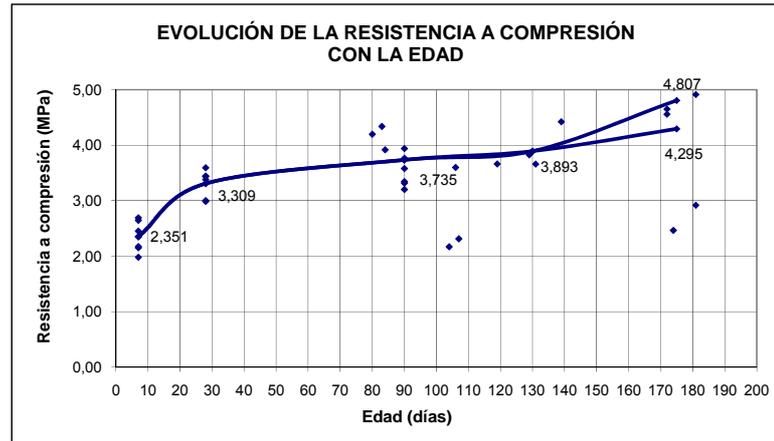


Figura 65. Evolución de la resistencia a compresión de los medios prismas obtenidos del ensayo a flexotracción

En este caso se han incluido algunas de las resistencias obtenida en los ensayos en la segunda fase (a 130 y 175 días) que no se consideraron en la evolución obtenida en las resistencias a flexotracción, aunque hay que sesgar la muestra al obtenerse resultados de resistencia más bajos en un par de probetas (FG6.12a y FG7.2a), por la variabilidad de las características del material ya citadas en el apartado anterior.

La evolución de resistencias a compresión de 7 a 28 días es muy superior a la obtenida en flexotracción, aunque el crecimiento después se amortigua a 90 días (conviene recordar que la muestra es pequeña). La evolución de 7 a 90 días, es en ambos casos muy similar y próxima al 50% (factor de crecimiento  $k = 1,5$ ), obteniéndose una evolución a mucho más largo plazo que puede llegar hasta el 100% de incremento ( $k = 2$ ), resultando una proporción de 1,8 si se consideran los resultados obtenidos a 492 días, que no parecen demasiado lógicos, aunque no se han apreciado daños en las probetas.

Es decir, se corrobora el resultado a 90 días de que la resistencia a compresión es 1,5 veces la obtenida a 7 días que se expuso en el apartado 6.2, pero a largo plazo esta se incrementa, obteniéndose valores 1,8 a 2 veces superior (se puede considerar el valor doble porque los resultados obtenidos a 492 días parecen muy reducidos, aunque dependerá de las características del material).

$$R_{C,90d} = 1,5 R_{C,7d}$$

$$R_{C,LP} = 1,8 \text{ a } 2 R_{C,7d}$$

según el material

Este resultado coincide con los valores que adopta la Norma de secciones de firme de la Comunitat Valenciana<sup>(73)</sup>, en la que se considera que la resistencia a compresión a largo plazo es el doble que la obtenida a 7 días para materiales granulares tratados con cemento.

En el Manual de firmes con capas tratadas con cemento<sup>(18)</sup> del CEDEX-IECA, se presenta diferente evolución de la resistencia a compresión con la edad según el contenido de cemento dosificado. Dicha evolución depende siempre del tipo de cemento utilizado y de la resistencia del material a edades tempranas. Cuanto mayor es el contenido de adiciones en el cemento, mayor es la relación entre las resistencias a corto y largo plazo, y cuanto menor es la resistencia del material a edades tempranas, mayor es también la relación citada.

Para un hormigón compactado (de 300 kg de cemento) se establecen valores de la relación entre resistencia a compresión a 7 días y a largo plazo variable entre 1,5 y 2,3, mientras que para un suelocemento se definen valores variables entre 2,8 y 3,8.

### **6.3.3. Ensayos de rotura a tracción indirecta de las medias probetas ensayadas a flexotracción**

De las probetas prismáticas que se han ensayado a flexotracción (o incluso a fatiga) se obtienen dos partes que, como ya se ha comentado, se ensayan una a compresión y otra mitad a tracción indirecta. Si a la probeta se la ha denominado con un número X, a la mitad que se ensaya a tracción se le denomina Xb. Todos los resultados obtenidos se incluyen en la tabla A2.18 del anejo 2, exponiéndose a continuación un resumen de los mismos:

Tablas 80 y 81. Resistencia a tracción indirecta de las medias probetas rotas previamente a flexotracción

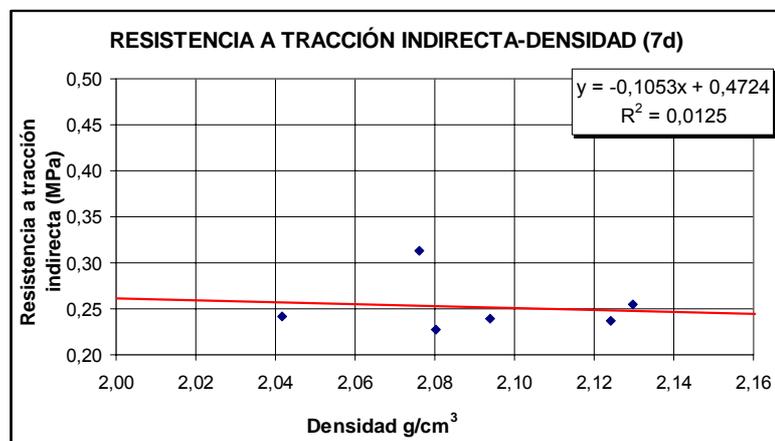
1ª FASE (AÑOS 2007 - 2008)					
Probeta nº	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad Media (g/cm <sup>3</sup> )	Días de curado	Resistencia a tracción indirecta (MPa)	Resistencia media a tracción indirecta (MPa)
EA4.1.b	2,076	2,091	7	0,313	0,252
EA5.1.b	2,080		7	0,227	
EA6.1.b	2,042		7	0,242	
EA7.1.b	2,124		7	0,237	
EA8.1.b	2,094		7	0,240	
EA9.1.b	2,130		7	0,255	
EA1.1.b	2,101		2,104	28	
EA1.2.b	2,106	28		0,379	
EA2.1.b	2,108	28		0,266	
EA2.2.b	2,125	28		0,355	
EA3.1.b	2,099	28		0,292	
EA3.2.b	2,084	28		0,271	
EA4.2.b	2,109	2,114	90	0,520	0,417
EA5.2.b	2,108		90	0,313	
EA6.2.b	2,075		90	0,402	
EA7.2.b	2,128		90	0,447	
EA8.2.b	2,124		90	0,423	
EA9.2.b	2,139		90	0,398	

2ª FASE (AÑOS 2009 - 2010)						
Probeta n°	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad media (g/cm <sup>3</sup> )	Días de curado	Edad Media	Resistencia a tracción indirecta (MPa)	Resistencia media a tracción (MPa)
FG6.1.b	2,091	2,102	80	82	0,488	0,476 0,437 **
FG6.3b	2,079		83		0,483	
FG6.5b	2,137		84		0,457	
FG5.1b	2,075	2,106	104	106	0,209	0,225
FG11.1b	2,189		106		0,310	
FG6.8b	2,054		107		0,155	
FG10.1b	2,051	2,101	119	130	0,380	0,385
FG6.10b	2,113		129		0,394	
FG10.4b	2,066		131		0,379	
FG10.6b	2,174		139		0,386	
FG9.4b	2,104	2,106	172	175	0,427	0,299 0,373 *
FG9.1b	2,138		172		0,345	
FG8.2b	2,161		173		0,314	
FG7.2b	2,051		174		0,128	
FG6.11b	2,148		181		0,405	
FG6.12b	2,035		181		0,174	
FG4.1.b	2,065	2,078	492	492	0,198	0,288 0,333 *
FG4.2.b	2,086		492		0,273	
FG4.4.b	2,083		492		0,393	

\* eliminando el peor valor

\*\* valor medio considerando resultados 1ª y 2ª fase

En las gráficas siguientes se puede ver que no existe una relación directa entre los resultados obtenidos de la resistencia a tracción indirecta y la densidad a 7 y 28 días. Como en los casos anteriores, esto es lógico ya que la densidad se calcula sobre toda la probeta mientras que sólo se ensaya una de las mitades obtenidas del ensayo de flexotracción.



Figuras 66. Relación densidad – resistencia a tracción indirecta en medias probetas prismáticas rotas a flexotracción a 7 días

Tabla 82. Análisis estadístico de resistencia a tracción indirecta de las medias probetas obtenidas de la rotura a flexotracción a 7 días

TRACCIÓN INDIR. MITAD FLEX 7 DÍAS	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	6
Media	0,2523
Varianza	0,0010
Desviación estándar	0,0311
Mínimo	0,227
Máximo	0,313
Rango	0,086
Coefficiente de Asimetría	2,0071
Coefficiente de Curtosis	2,1584

Tabla 83. Análisis estadístico relación  $R_{ti}$  semiprismas - densidad a 7 días

R. TRACCIÓN SEMIPRISMAS – DENSIDAD 7 DÍAS	
Coefficiente de correlación	-0,1109
$R^2$	0,0125
Error estándar de la estimación	0,0345
Error promedio	0,0219
Estadístico Durbin-Watson	1,6396 (P=0,2197)

La gráfica de relación entre los resultados obtenidos de la resistencia a tracción indirecta y la densidad a 28 días resulta:

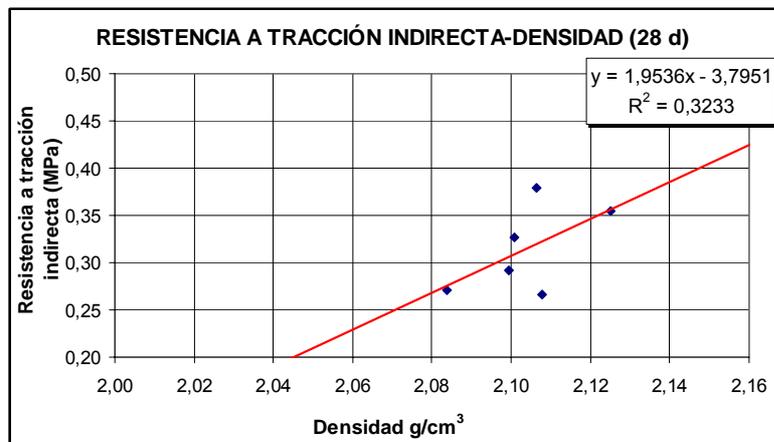


Figura 67. Relación densidad – resistencia tracción indirecta de medias probetas obtenidas de la rotura a flexotracción a 28 días.

Tabla 84. Análisis estadístico de resistencia a tracción indirecta de las mitades obtenidas de la rotura a flexotracción a 28 días

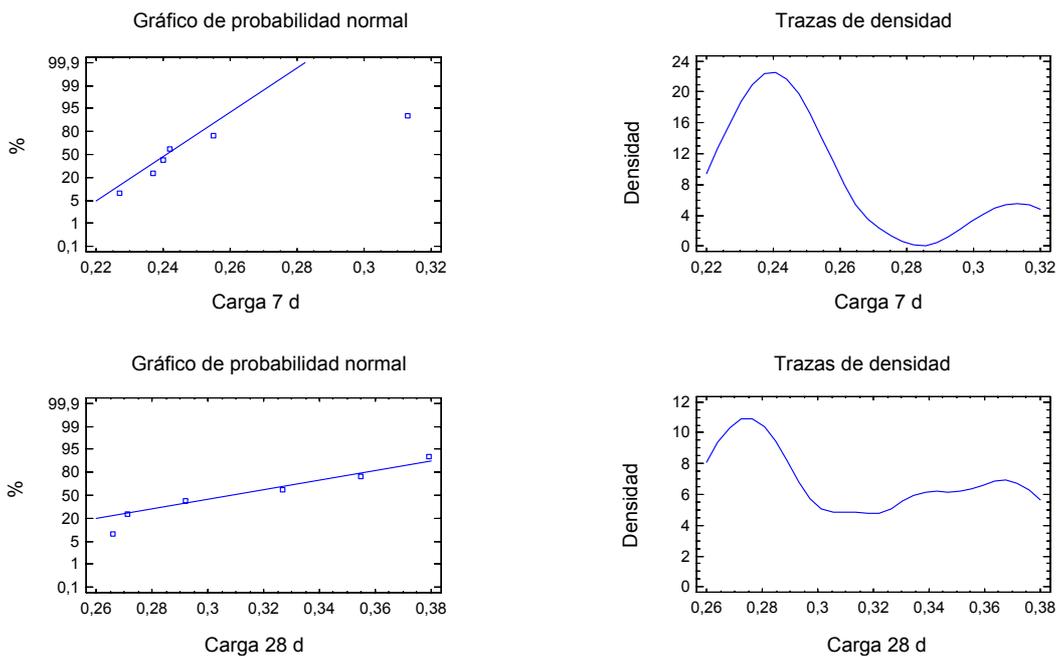
TRACCIÓN IN. MITAD FLEX 28 DÍAS	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	6
Media	0,315
Varianza	0,0021
Desviación estándar	0,0463
Mínimo	0,266
Máximo	0,379
Rango	0,113
Coefficiente de Asimetría	0,3418
Coefficiente de Curtosis	-0,8996

Tabla 85. Análisis estadístico relación  $R_{ti}$  semiprismas - densidad a 28 días

R. TRACCIÓN SEMIPRISMAS – DENSIDAD 28 DÍAS	
Coefficiente de correlación	0,5593
$R^2$	0,3233
Error estándar de la estimación	0,0429
Error promedio	0,0258
Estadístico Durbin-Watson	2,5586 (P=0,1644)

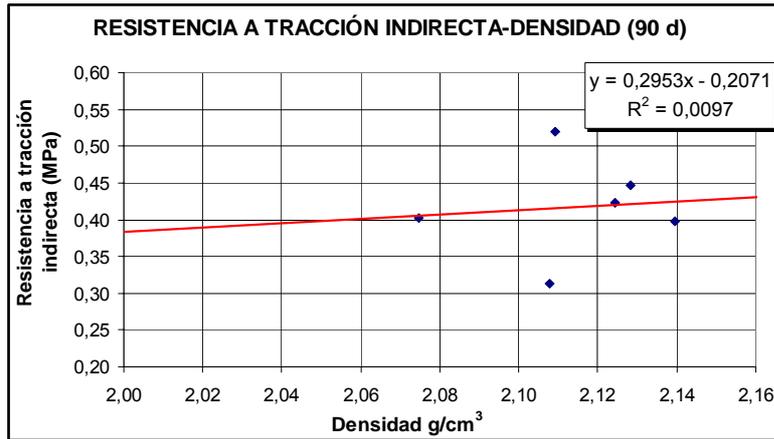
En este caso la varianza de los datos aumenta con la edad. Aunque carece de sentido lógico, el reducido tamaño de la muestra puede ser la causa por lo que sería necesario realizar más ensayos para estudiarlo con mayor precisión. A 7 días se obtiene un valor anómalo que se separa demasiado del resto de resultados y resulta muy superior (0,313 MPa). Algo similar sucede a 28 días donde uno de los valores es muy bajo para la densidad obtenida (0,266 MPa). Si se suprime dicho valor el modelo explica un 57,75% de la variabilidad.

Las gráficas de aproximación a la distribución normal para las probetas de 7 y 28 días son de la siguiente forma:



Figuras 68 y 69. Comparación de resistencias a tracción indirecta de medias probetas a 7 y 28 días con una distribución normal

La gráfica relación resistencia a tracción indirecta – densidad que se obtiene con los resultados a 90 días es:



Figuras 70. Relación densidad – resistencia a tracción indirecta en medias probetas obtenidas de la rotura a flexotracción a 90 días

Tablas 86. Análisis estadístico de resistencia a tracción indirecta de las mitades obtenidas de la rotura a flexotracción a 90 días

TRACCIÓN IND. MITAD FLEX 90 DÍAS	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	6
Media	0,4171
Varianza	0,0046
Desviación estándar	0,0678
Mínimo	0,313
Máximo	0,520
Rango	0,207
Coficiente de Asimetría	-0,0220
Coficiente de Curtosis	1,4113

Tabla 87. Análisis estadístico relación  $R_{ti}$  semiprismas - densidad a 90 días

R. TRACCIÓN SEMIPRISMAS – DENSIDAD 90 DÍAS	
Coficiente de correlación	0,0922
$R^2$	0,0097
Error estándar de la estimación	0,0754
Error promedio	0,0443
Estadístico Durbin-Watson	2,403 (P=0,1931)

Y a largo plazo, es decir las probetas ensayadas a 90 días en la primera fase más las ensayadas en la segunda fase a diferentes edades, la gráfica y parámetros estadísticos que se obtienen del correspondiente análisis resultan:

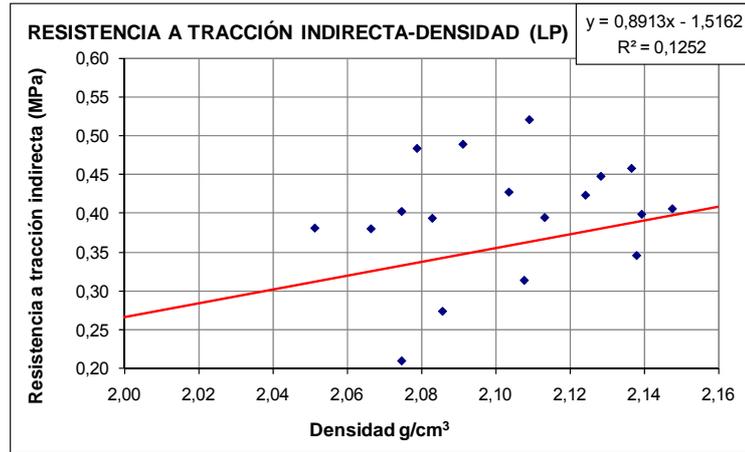


Figura 71. Relación densidad – resistencia tracción indirecta en medias probetas obtenidas de la rotura a flexotracción a largo plazo

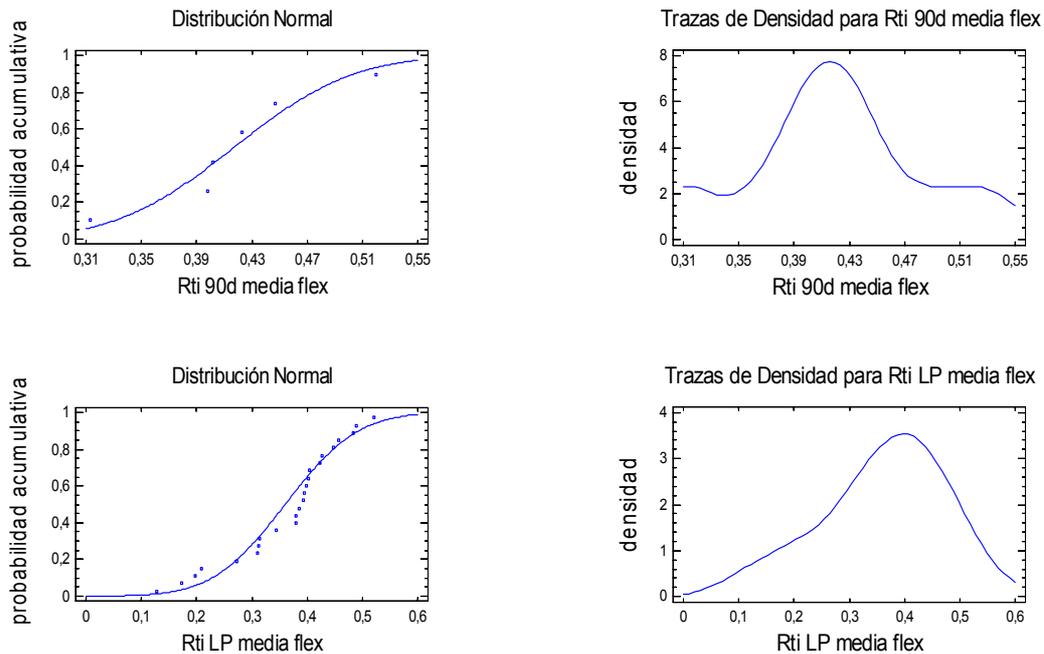
Tabla 88. Análisis estadístico de resistencia a tracción indirecta de las medias probetas obtenidas de la rotura a flexotracción a largo plazo

TRACCIÓN IND MITAD FLEX LARGO PLAZO	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	24
Media	0,3603
Varianza	0,0106
Desviación estándar	0,1030
Mínimo	0,128
Máximo	0,520
Rango	0,392
Coficiente de Asimetría	-0,7540
Coficiente de Curtosis	-0,0343

Tabla 89. Análisis estadístico relación  $R_{ti}$  semiprismas - densidad a largo plazo

R. TRACCIÓN SEMIPRISMAS – DENSIDAD LARGO PLAZO	
Coficiente de correlación	0,3532
$R^2$	0,1252
Error estándar de la estimación	0,0984
Error promedio	0,0815
Estadístico Durbin-Watson	1,2384 (P=0,0226)

Las gráficas de aproximación a la distribución normal para las probetas de 90 días y largo plazo resultan:



Figuras 72 y 73. Comparación de resistencias obtenidas a tracción indirecta de mitades ensayadas previamente a flexotracción a 90 días y largo plazo con una distribución normal

La evolución de la resistencia a tracción indirecta de las medias probetas ensayadas en la primera fase, comparada con la evolución de la resistencia a compresión, se puede observar en la siguiente gráfica:

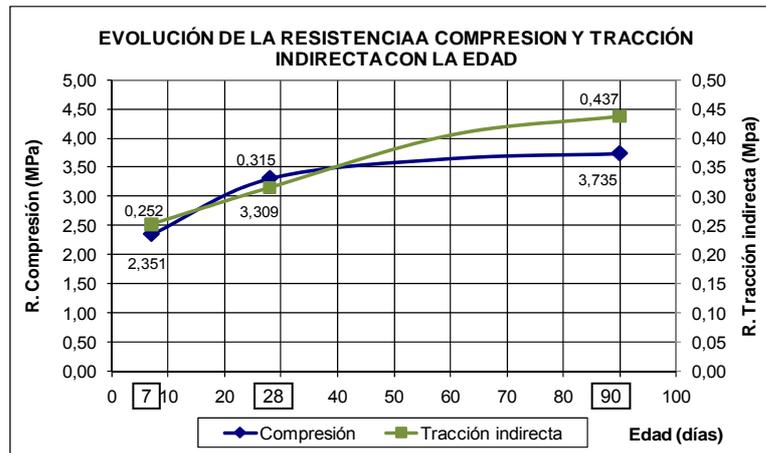


Figura 74. Evolución de la resistencia a tracción indirecta de los medios prismas obtenidos del ensayo a flexotracción

Los valores medios de evolución de la resistencia a tracción indirecta obtenidos son los definidos en la siguiente tabla:

Tabla 90. Incremento de resistencia a tracción indirecta de las medias probetas con la edad

7 días	28 días	90 días	$\Delta$ 7-28 días	$\Delta$ 28-90 días	$\Delta$ 7-90 días
0,252	0,315	0,437	25,00 %	38,73 %	73,41 %

El incremento de resistencia a tracción indirecta del material de 7 a 90 días es muy superior ( $K=1,73$ ) al obtenido con la resistencia a flexotracción y a compresión (1,53 y 1,58 respectivamente).

Como en el caso de resistencias a flexotracción, no se pueden incluir los datos obtenidos en la segunda fase por la variabilidad del material, que hace que se obtengan a edades mayores, resistencias incluso más bajas que a cortas edades. Por eso se obtiene una relación del orden  $R_{ti,90d} = 1,73 R_{ti,7d}$  que no llega al valor de  $R_{ti,90d} = 2 R_{ti,7d}$  obtenido en el apartado 6.2.2., probetas cilíndricas, ensayos de rotura a tracción indirecta.

En realidad, las dos líneas representadas en la figura anterior correspondientes a la evolución de las resistencias a compresión y a tracción indirecta tienden a igualarse al obtenerse a muy largo plazo valores de  $R_c$  de 4,807 MPa y valores de  $R_{ti}$  de 0,437 MPa.

En comparación con los resultados obtenidos a tracción indirecta sobre probeta cilíndrica, los valores obtenidos a la edad de 7 días son muy superiores (0,25 MPa frente a 0,19 MPa) y aunque los valores siguen siendo mayores en las diferentes edades ensayadas, sin embargo la evolución o el incremento proporcional de resistencias con la edad resulta inferior.

No obstante, si en los resultados obtenidos a 7 días se elimina la probeta EA4.1b que arroja un resultado de resistencia a tracción indirecta anormalmente alto (0,313), la media de los valores de resistencia obtenidos a 7 días resulta 0,240 MPa y la evolución de resistencias obtenida supone una relación del orden  $R_{ti,90d} = 1,82 R_{ti,7d}$  que se aproxima más a la relación obtenida en probetas cilíndricas.

#### **6.3.4. Relaciones entre tipos de resistencia**

Veamos si existe una relación clara entre las resistencias compresión-flexotracción y tracción indirecta-flexotracción a las diferentes edades ensayadas.

De forma resumida y agrupada, los resultados obtenidos y expuestos en los apartados anteriores han sido:

Tablas 91 y 92. Relaciones resistencia flexotracción – compresión indirecta obtenidas

1ª FASE (AÑOS 2007 - 2008)								
Probeta nº	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Días de curado	Resistencia a flexotracción (MPa)	Resistencia media a flexotracción (MPa)	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia media a compresión (MPa)	Resistencia a tracción indirecta (MPa)	Resistencia media a tracción indirecta (MPa)
EA4.1	2,076	7	0,533	0,452	2,694	2,351	0,313	0,252
EA5.1	2,080		0,458		1,983		0,227	
EA6.1	2,042		0,445		2,154		0,242	
EA7.1	2,124		0,388		2,648		0,237	
EA8.1	2,094		0,466		2,454		0,240	
EA9.1	2,130		0,421		2,174		0,255	
EA1.1	2,101	28	0,561	0,535	3,442	3,309	0,327	0,315
EA1.2	2,106		0,578		3,594		0,379	
EA2.1	2,108		0,468		3,381		0,266	
EA2.2	2,125		0,576		3,444		0,355	
EA3.1	2,099		0,537		2,990		0,292	
EA3.2	2,084		0,490		3,002		0,271	
EA4.2	2,109	90	0,806	0,693	3,766	3,526	0,520	0,417
EA5.2	2,108		0,598		3,344		0,313	
EA6.2	2,075		0,580		3,203		0,402	
EA7.2	2,128		0,775		3,940		0,447	
EA8.2	2,124		0,787		3,581		0,423	
EA9.2	2,139		0,610		3,317		0,398	

2ª FASE (AÑOS 2009 - 2010)									
Probeta nº	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Días de curado	Resistencia a flexotracción (MPa)	Resistencia media a flexotracción (MPa)	Días de curado	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia media a compresión (MPa)	Resistencia a tracción indirecta (MPa)	Resistencia media a tracción indirecta (MPa)
FG6.1.a	2,091	79	0,538	0,587	80	4,199	4,152 3,735 **	0,488	0,476 0,437 **
FG6.3.a	2,079	80	0,667		83	4,340		0,483	
FG6.5.a	2,137	84	0,556		84	3,918		0,457	
FG5.1.a	2,075	104	0,366	0,363	104	2,169	2,694	0,209	0,225
FG11.1.a	2,189	93	0,501		106	3,600		0,310	
FG6.8.a	2,054	100	0,221		107	2,313		0,155	
FG10.1.a	2,051	119	0,561	0,521 0,544*	119	3,663	3,893	0,380	0,385
FG6.10.a	2,113	126	0,638		129	3,827		0,394	
FG10.4.a	2,066	127	0,516		131	3,660		0,379	
FG6.11.a	2,148	132	0,461						
FG6.12.a	2,035	132	0,427						
FG10.6.a	2,174	139	0,667	0,591 0,633*	139	4,423	4,102 4,807 *	0,386	0,299 0,373 *
FG9.1.a	2,138	145	0,673		172	4,651		0,345	
FG9.4.a	2,104	145	0,609		172	4,559		0,427	
FG8.2.a	2,161	146	0,585		173	5,103		0,314	
FG7.2.a	2,051	147	0,420		174	2,465		0,128	
FG6.11.a	2,148				181	4,914		0,405	
FG6.12.a	2,035			181	2,919	0,174			
FG4.1.a	2,065	492	0,361	0,437	492	2,273	2,939 3,272 *	0,198	0,288 0,333 *
FG4.2.a	2,086	492	0,350		492	2,896		0,273	
FG4.4.a	2,083	492	0,599		492	3,649		0,393	

\* eliminando el peor valor

\*\* valor medio considerando resultados 1ª y 2ª fase

Para analizar todos los resultados se realiza un análisis mediante un modelo de regresión lineal buscando las relaciones que pueda existir entre las diferentes variables o resistencias. Se calculará en todos los casos el coeficiente de correlación, que se recuerda es una medida de dependencia lineal entre dos variables que está comprendido entre -1 y 1 y muestra la relación existente entre ambas variables (mayor relación cuanto más se aproxime el coeficiente a 1).

### 6.3.4.1. Relación resistencia a flexotracción – resistencia a compresión

En este apartado se incluyen las gráficas donde se obtienen las rectas o líneas de tendencia de la relación resistencia a compresión – resistencia a flexotracción sobre probetas prismáticas a diferentes edades y se analiza estadísticamente la relación entre estas variables. Las edades consideradas son 7 días, 28 días y 90 días, además de las obtenidas en la 2ª fase, que se denominará así e incluyen las probetas ensayadas en los años 2009 y 2010 (que se supone un material más homogéneo) y a largo plazo (con 90 o más días ensayadas en cualquier fase, años 2007 a 2010, cuya menor homogeneidad ha sido observada).

Las gráficas y análisis estadísticos para cada edad citada son los siguientes:

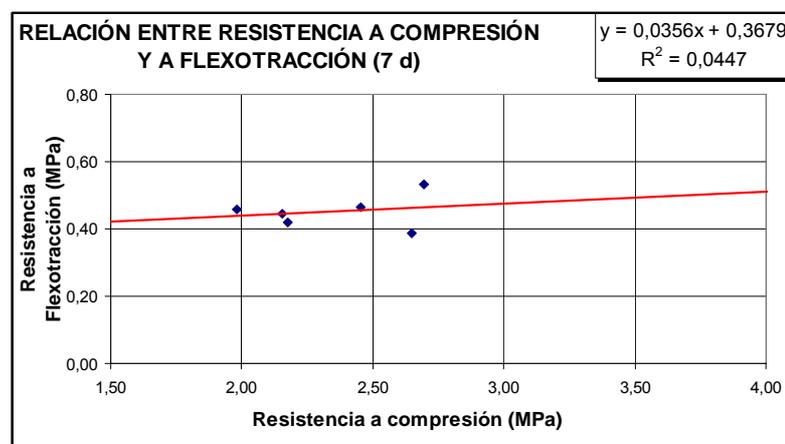


Figura 75. Relación resistencia compresión – flexotracción a 7 días

Tabla 93. Análisis estadístico del cociente resistencia flexotracción / compresión a 7 días

FLEXOTR./ COMPRES. 7 DÍAS	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	6
Media $R_f/R_c$	0,1941
Varianza	0,0008
Desviación estándar	0,0276
Mínimo	0,146
Máximo	0,231
Rango	0,084
Coficiente de Asimetría	-0,8307
Coficiente de Curtosis	2,2398

Tabla 94. Análisis estadístico entre las variables  $R_f$  y  $R_c$  a 7 días

R. FLEXOTRACCIÓN – COMPRESIÓN 7 DÍAS	
Coficiente de correlación	0,2099
$R^2$	0,0447
Error estándar de la estimación	0,0533
Error promedio	0,0330
Estadístico Durbin-Watson	1,479 (P=0,2951)

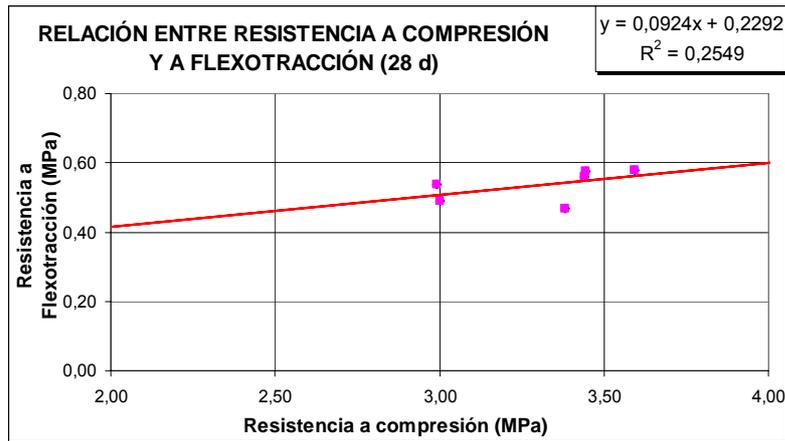


Figura 76. Relación resistencia compresión – flexotracción a 28 días.

Tabla 95. Análisis estadístico del cociente resistencia flexotracción / compresión a 28 días

FLEXOTR./ COMPRES. 28 DÍAS	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	6
Media $R_f/R_c$	0,1621
Varianza	0,0002
Desviación estándar	0,0134
Mínimo	0,138
Máximo	0,180
Rango	0,041
Coficiente de Asimetría	-0,9372
Coficiente de Curtosis	2,6016

Tabla 96. Análisis estadístico entre las variables  $R_f$  y  $R_c$  a 28 días

R. FLEXOTRACCIÓN – COMPRESIÓN 28 DÍAS	
Coficiente de correlación	0,5066
$R^2$	0,2549
Error estándar de la estimación	0,0446
Error promedio	0,0301
Estadístico Durbin-Watson	2,6220 (P=0,051)

En ninguno de los casos (7 o 28 días) existe relación estadísticamente significativa entre la resistencia a flexotracción y a compresión para un nivel de confianza del 90 % o superior. Se debe considerar el limitado tamaño de la muestra. Para 90 días se obtiene:

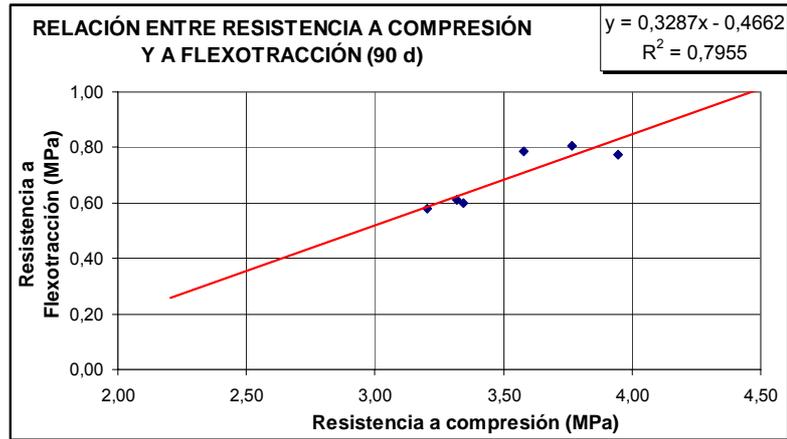


Figura 77. Relación resistencia compresión - flexotracción a 90 días.

Tabla 97. Análisis estadístico del cociente resistencia flexotracción / compresión a 90 días

FLEXOTR./ COMPRES. 90 DÍAS	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	6
Media $R_f/R_c$	0,1957
Varianza	0,0003
Desviación estándar	0,0176
Mínimo	0,179
Máximo	0,220
Rango	0,041
Coefficiente de Asimetría	0,5948
Coefficiente de Curtosis	-1,9114

Tabla 98. Análisis estadístico entre las variables  $R_f$  y  $R_c$  a 90 días

R. FLEXOTRACCIÓN – COMPRESIÓN 90 DÍAS	
Coefficiente de correlación	0,8921
$R^2$	0,7955
Error estándar de la estimación	0,0540
Error promedio	0,0370
Estadístico Durbin-Watson	2,9096 (P=0,1544)

Y la gráfica de las probetas correspondientes a la 2ª fase, es decir las probetas ensayadas en los años 2009 y 2010 con más de 80 días (de 80 a 435 días), que no incluyen las ensayadas a 90 días en la primera fase anteriormente consideradas, son:

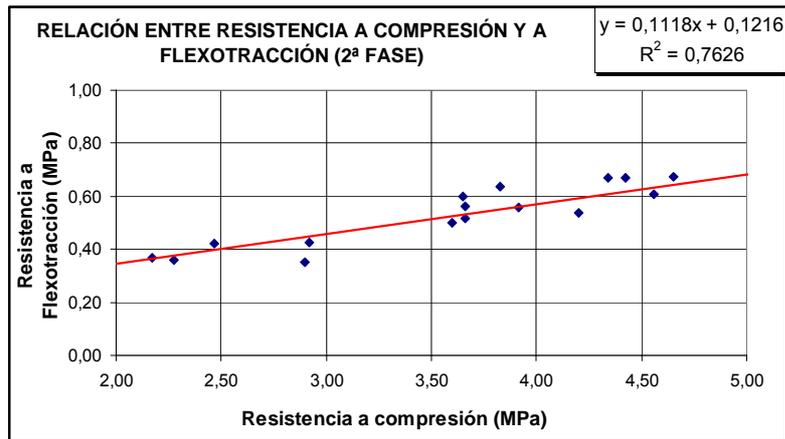


Figura 78. Relación resistencia compresión – flexotracción de probetas de la 2ª fase

Para el cálculo de la recta de regresión se ha suprimido la probeta FG6.8 que con 100 días de edad arroja un valor de resistencia a compresión bajo (2,313 MPa), pero sobre todo un valor de resistencia flexotracción muy reducido (0,221 MPa), por lo que el valor de la relación  $R_f/R_c = 0,096$  está fuera de lo lógico (valor medio 0,160). El análisis estadístico en este caso resulta:

Tabla 99. Análisis estadístico del cociente resistencia flexotracción / compresión probetas de la 2ª fase

FLEXOTR./ COMPRES. 2ªFASE	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	17
Media $R_f/R_c$	0,1469
Varianza	0,0003
Desviación estándar	0,0165
Mínimo	0,115
Máximo	0,170
Rango	0,056
Coefficiente de Asimetría	-0,3503
Coefficiente de Curtosis	-0,5632

Tabla 100. Análisis estadístico entre las variables  $R_f$  y  $R_c$  probetas de la 2ª fase

R. FLEXOTRACCIÓN – COMPRESIÓN PROBETAS DE LA 2ª FASE	
Coefficiente de correlación	0,8738
$R^2$	0,7626
Error estándar de la estimación	0,0557
Error promedio	0,0418
Estadístico Durbin-Watson	2,1520 (P=0,3523)

En estos dos últimos casos (90 días y 2ª fase) si existe relación estadísticamente significativa entre la resistencia a flexotracción y a compresión para un nivel de confianza del 95% y el 99% respectivamente.

Queda por último la gráfica y estudio estadístico de las probetas correspondientes a largo plazo, es decir la totalidad de las probetas ensayadas con una edad superior a los 80 días, sin diferenciar si corresponden a la 1ª o 2ª fase (población suma de las dos anteriores).

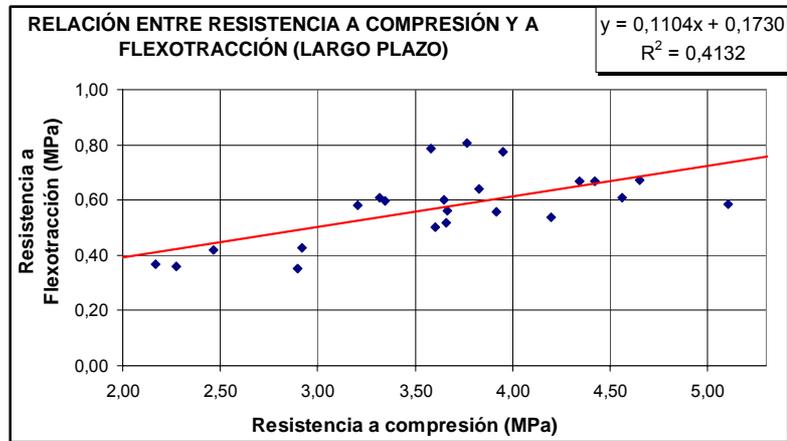


Figura 79. Relación resistencia compresión – flexotracción de probetas a largo plazo

Tabla 101. Análisis estadístico del cociente resistencia flexotracción / compresión a largo plazo

FLEXOTR./ COMPRES. L.P.	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	23
Media $R_f/R_c$	0,1596
Varianza	0,0007
Desviación estándar	0,0273
Mínimo	0,115
Máximo	0,220
Rango	0,105
Coficiente de Asimetría	0,5752
Coficiente de Curtosis	0,0357

Tabla 102. Análisis estadístico entre las variables  $R_f$  y  $R_c$  a largo plazo

R. FLEXOTRACCIÓN – COMPRESIÓN LARGO PLAZO	
Coficiente de correlación	0,6429
$R^2$	0,4132
Error estándar de la estimación	0,1016
Error promedio	0,0757
Estadístico Durbin-Watson	0,8859 (P=0,0013)

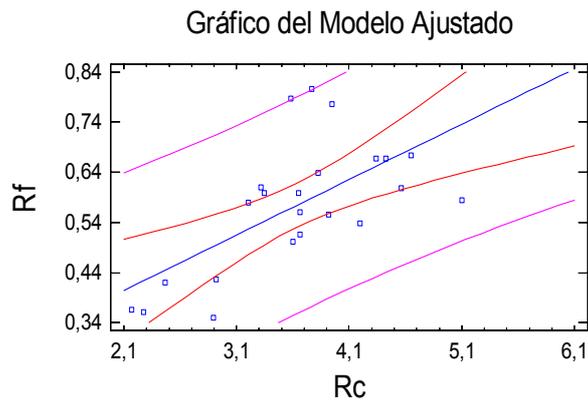


Figura 80. Gráfico de la relación lineal entre resistencia flexotracción – compresión largo plazo

Si se eliminan las 3 probetas de valor próximo a 0,80 MPa (EA4.2, EA7.2 y EA8.2) se obtiene una línea de mayor aproximación ( $R^2 = 0,6387$ ) y coeficientes (pendiente y término) similares.

La relación entre la resistencia a flexotracción y a compresión en la segunda fase (probetas ensayadas en el 2009 y 2010) y largo plazo (todas las probetas de más de 90 días de los años 2007 a 2010) es muy similar y es del tipo siguiente:

$$R_{f,LP} = 0,11 R_{C,LP} + 0,17$$

Como se ha comprobado y expuesto en el apartado 6.3.2. la resistencia a compresión a largo plazo varía respecto a la medida en obra a 7 días en los siguientes valores:

$$R_{C,LP} = 1,8 \text{ a } 2 \cdot R_{C,7d}$$

Por lo que se puede obtener del lado de la seguridad que la resistencia a flexotracción a largo plazo del material está relacionada con la resistencia a compresión a 7 días, que es la que se controla en la obra, por la relación siguiente:

$$R_{f,LP} = 0,20 R_{C,7d} + 0,17$$

Aunque existe una relación estadísticamente significativa entre la resistencia a flexotracción y la resistencia a compresión para un nivel de confianza del 99%, el modelo explica únicamente un 41,329% de la variabilidad en la resistencia a flexotracción a largo plazo (este valor se eleva a 63,87% eliminando los 3 valores citados próximos a una  $R_f$  de 0,8 MPa). El coeficiente de correlación es igual a 0,642876, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables.

Si a la muestra se incorpora la probeta FG6.8 que como se comentó arroja un valor de resistencia a flexotracción muy bajo para su edad de 100 días, la precisión de la recta de tendencia anterior se incrementa y el modelo explica un 48,20% de la variabilidad en la resistencia a flexotracción a largo plazo. El coeficiente de correlación se incrementa a 0,6943 y los errores resultan 0,1072 el estándar de la estimación y 0,0776 el error absoluto medio (estadístico de Durbin-Watson de 0,9715 con P=0,0024). En este caso la ecuación cambia a:

$$R_{f,LP} = 0,129 R_{c,LP} + 0,098$$

La relación se puede establecer con mayor precisión a través de una ecuación doble inversa en la que el modelo explica un 63,88% ( $R^2 = 0,638828$ ) de la variabilidad en la resistencia a flexotracción a largo plazo después de la transformación a escala recíproca para linealizar el modelo. El coeficiente de correlación de 0,799267 que se obtiene, indica una relación moderadamente fuerte entre las variables. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 0,2892 y el error absoluto medio de 0,2149 es el valor medio de los residuos (estadístico de Durbin-Watson de 1,2430 con P=0,0269). La ecuación doble inversa viene definida por la siguiente expresión:

$$R_{f,LP} = \frac{1}{0,281187 + \frac{5,40234}{R_{c,LP}}}$$

En este caso la representación gráfica resulta:

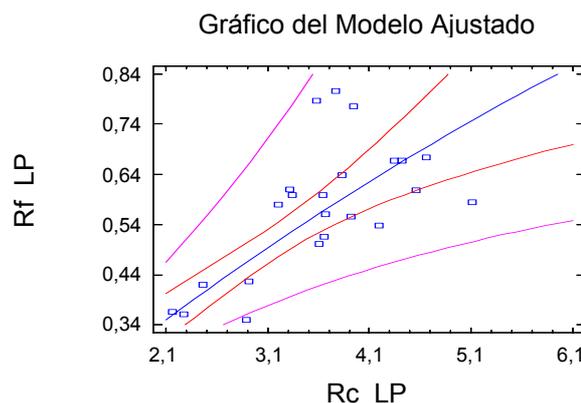


Figura 81. Gráfico de la relación doble inversa entre resistencia flexotracción – compresión largo plazo

En este caso de establecer la relación a través de una ecuación doble inversa si se suprimen en el análisis los resultados de las 3 probetas citadas (EA4.2, EA7.2 y EA8.2), cuya resistencia a flexotracción parece más elevada, se obtiene un valor  $R^2$  de 0,723495, con un coeficiente de correlación de 0,850585 que indica una fuerte relación entre las variables. En este caso, el modelo que explica un 72,35% de la variabilidad, sería de la forma:

$$R_{f,LP} = \frac{1}{0,442802 + \frac{5,08112}{R_{C,LP}}}$$

Como es lógico y puede comprobarse existe una relación directa entre la resistencia a flexotracción y la resistencia a compresión, aumentando una a medida que lo hace la otra. Se observa además que la pendiente de la línea de tendencia es mayor cuanto más edad tienen las probetas hasta los 90 días, es decir la relación resistencia flexotracción – compresión es mayor, o lo que es lo mismo, la resistencia a flexotracción aumenta más rápidamente que la resistencia a compresión (salvo si cambian las características del material) hasta los 90 días o a largo plazo respecto a 7 y 28 días.

La varianza es muy baja y disminuye con la edad en los resultados obtenidos en el primer periodo (años 2007 y 2008) por el mayor efecto del conglomerante como ya se comentó, sin embargo crece algo cuando se incluyen los valores del segundo periodo por ser un material de características algo diferentes, que logra resistencias también algo más bajas.

Los coeficientes de correlación obtenidos en cada caso son:

$$\begin{aligned} C_{(7 \text{ días})} &= 0,2099 & R^2 &= 0,0447 \\ C_{(28 \text{ días})} &= 0,5066 & R^2 &= 0,2549 \\ C_{(90 \text{ días})} &= 0,8921 & R^2 &= 0,7955 \\ C_{(2^{\text{a}} \text{ fase})} &= 0,8738 & R^2 &= 0,7626 \\ C_{(\text{largo plazo})} &= 0,6429 & R^2 &= 0,4132 \end{aligned}$$

Dichos coeficientes de correlación se aproximan a los 90 días y en la segunda fase al valor 1, lo que demuestra la relación que existe entre estas variables (resistencia a flexotracción y a compresión), sobre todo a mayor edad.

La evolución de la relación entre ambas resistencias a compresión y a flexotracción con la edad queda recogida en la gráfica siguiente:

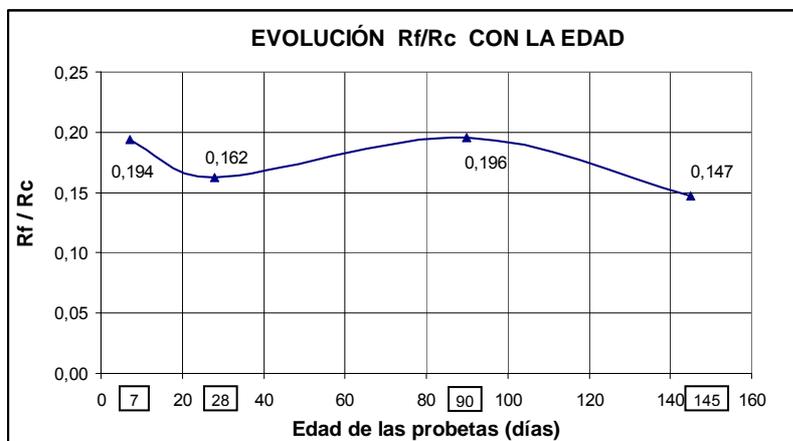


Figura 82. Evolución de la relación resistencia flexotracción - compresión a diferentes edades

La dispersión que introducen las probetas realizadas en la segunda fase con valores de resistencias más bajos no debería influir en este caso puesto que no es más baja la relación entre resistencias a compresión y flexotracción. La causa de que a 90 días la evolución  $R_f/R_c$  aumente, respecto a la tendencia que ofrece a cualquier otra edad, puede deberse a las elevadas resistencias obtenidas a flexotracción a 90 días en las probetas prismáticas rotas en la primera etapa (0,69 MPa).

Los resultados obtenidos de relación entre las resistencias a flexotracción y a compresión de forma lineal (sin una ecuación de primer grado que pueda resultar más aproximada) serían:

$$R_{f,LP} = 0,15 R_{c,LP} = 0,27 R_{c, 7d}$$

Aunque como se comenta esta relación directa carece de la precisión obtenida con la ecuación lineal propuesta anteriormente ( $R^2 = 0,4132$ ):

$$R_{f,LP} = 0,20 R_{c,7d} + 0,17$$

Comparando las relaciones obtenidas con las establecidas en las diferentes normativas o bibliografías se obtiene las siguientes conclusiones:

- En el Manual de firmes con capas tratadas con cemento<sup>(18)</sup> del CEDEX – IECA se expone una gráfica de relación entre resistencia a flexotracción y resistencia a compresión de diferentes materiales en la que se observa que la relación  $R_f/R_c$  es menor para los materiales que presentan resistencias más altas. En concreto se definen relaciones de 0,2 – 0,25 para el suelocemento y del orden de 0,17 – 0,20 ( $R_f/R_c$ ) para la gravacemento y los hormigones compactados, que como se observa son algo superiores a los resultados obtenidos.
- En la Norma de secciones de firme de la Comunitat Valenciana<sup>(73)</sup> se establece para materiales granulares tratados con cemento una resistencia a flexotracción a largo plazo del orden de 0,18 veces la resistencia a compresión, que como se aprecia es ligeramente superior a la obtenida (se adoptan valores altos de resistencia a flexotracción de 0,9 MPa a largo plazo y se considera que la resistencia a compresión a largo plazo es el doble que a 7 días). Esta relación no está directamente establecida en la norma, pero se obtiene a través de las relaciones publicadas:

$$R_{f,LP} = 1,5 R_{ti,LP} = 1,5 \cdot (0,12 R_{c,LP}) = 0,18 R_{c,LP}$$

- En la Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía<sup>(20)</sup> inicialmente se establecen los valores estimados de resistencia a flexotracción a largo plazo de 0,72 MPa para el suelocemento (mucho más próximo al valor obtenido en esta tesis de 0,69 MPa), y de 1,3 MPa para la gravacemento.

- En el Manual de pavimentos industriales<sup>(74)</sup> del IECA se expone para pavimentos de hormigón una correlación entre la resistencia a flexotracción y la resistencia a compresión definida por la expresión:

$$R_f = 0,464 R_c^{2/3}$$

Aunque es difícil comparar esta expresión frecuentemente utilizada en pavimentos de hormigón, en el caso de reciclado no sería válida al obtenerse resultados de resistencia a flexotracción mucho más altos de los obtenidos.

### 6.3.4.2. Relación resistencia a flexotracción – resistencia a tracción indirecta

De forma similar se incluyen las gráficas donde se obtienen las rectas o líneas de tendencia de la relación resistencia a flexotracción – resistencia a tracción indirecta a diferentes edades. Las edades consideradas son, como en el caso anterior, 7 días, 28 días y 90 días, además de las obtenidas en la 2ª fase, que se denominará así e incluyen las probetas ensayadas en los años 2009 y 2010, y las probetas ensayadas a largo plazo (con 90 o más días ensayadas en cualquier fase, años 2007 a 2010, cuya menor homogeneidad se ha podido observar).

Las gráficas y análisis estadísticos para la edad de 7 y 28 días son los siguientes:

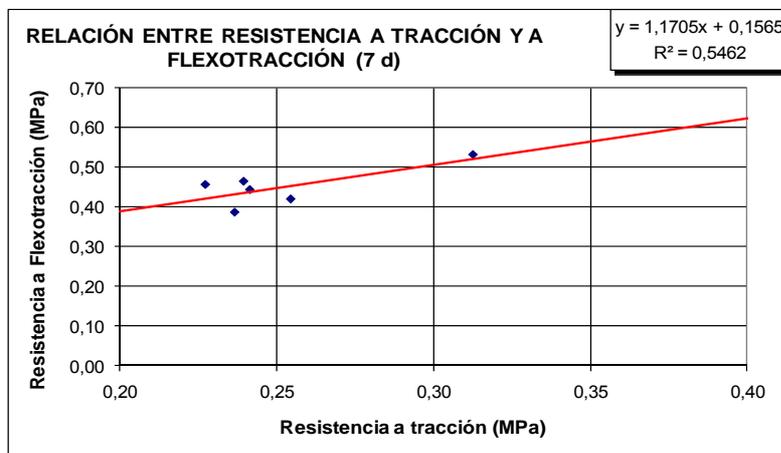


Figura 83. Relación resistencia tracción indirecta – flexotracción a 7 días.

Tabla 103. Análisis estadístico del cociente resistencia tracción indirecta / flexotracción a 7 días

FLEXOT./ TRACCIÓN 7 DÍAS	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	6
Media $R_f/R_{ti}$	1,7983
Varianza	0,0248
Desviación estándar	0,1575
Mínimo	1,637
Máximo	2,012
Rango	0,375
Coficiente de Asimetría	0,3634
Coficiente de Curtosis	-2,0265

Tabla 104. Análisis estadístico entre las variables  $R_f$  y  $R_{ti}$  a 7 días

R. FLEXOTRACCIÓN – TRACCIÓN IND. 7 DÍAS	
Coefficiente de correlación	0,7340
$R^2$	0,5462
Error estándar de la estimación	0,0370
Error promedio	0,0267
Estadístico Durbin-Watson	2,4709 (P=0,2193)

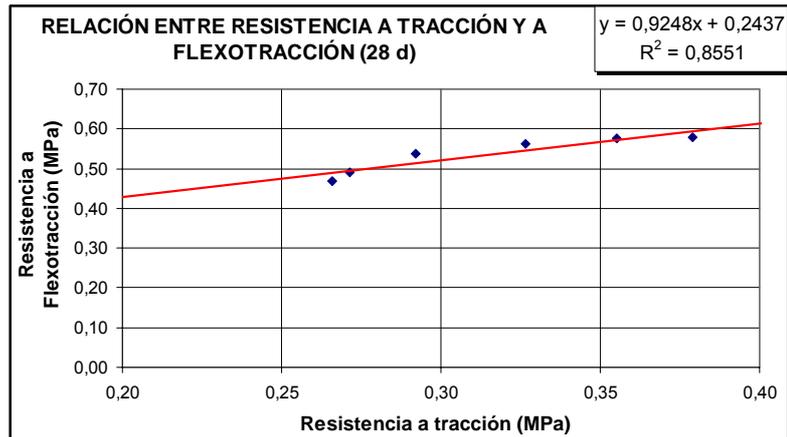


Figura 84. Relación resistencia tracción indirecta – flexotracción a 28 días.

Tabla 105. Análisis estadístico del cociente resistencia tracción indirecta / flexotracción a 28 días

FLEXOT./ TRACCIÓN 28 DÍAS	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	6
Media $R_f/R_{ti}$	1,7119
Varianza	0,0141
Desviación estándar	0,1189
Mínimo	1,526
Máximo	1,840
Rango	0,315
Coefficiente de Asimetría	-0,7388
Coefficiente de Curtosis	-0,5523

Tabla 106. Análisis estadístico entre las variables  $R_f$  y  $R_{ti}$  a 28 días

R. FLEXOTRACCIÓN – TRACCIÓN IND. 28 DÍAS	
Coefficiente de correlación	0,9259
$R^2$	0,8551
Error estándar de la estimación	0,0196
Error promedio	0,0140
Estadístico Durbin-Watson	1,8205 (P=0,4827)

A los 90 días se obtiene:

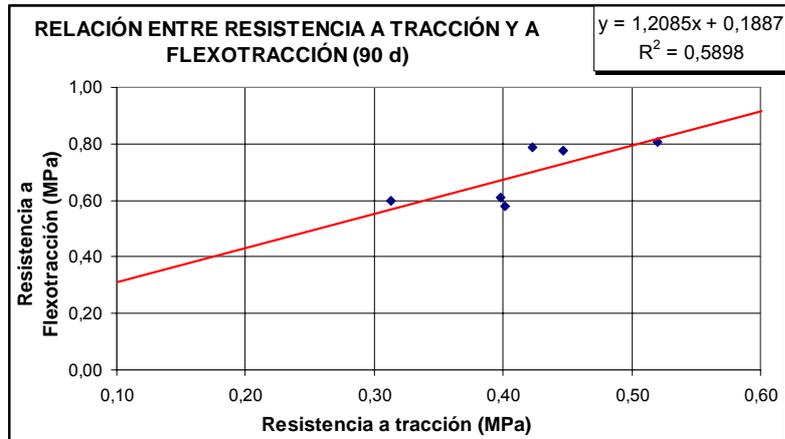


Figura 85. Relación resistencia tracción indirecta – flexotracción a 90 días.

Tabla 107. Análisis estadístico del cociente resistencia tracción indirecta / flexotracción a 90 días

FLEXOT./ TRACCIÓN 90 DÍAS	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	6
Media $R_f/R_{ti}$	1,6723
Varianza	0,0368
Desviación estándar	0,1919
Mínimo	1,445
Máximo	1,912
Rango	0,468
Coficiente de Asimetría	0,1894
Coficiente de Curtosis	-2,1512

Tabla 108. Análisis estadístico entre las variables  $R_f$  y  $R_{ti}$  a 90 días

R. FLEXOTRACCIÓN – TRACCIÓN IND. 90 DÍAS	
Coficiente de correlación	0,7690
$R^2$	0,5898
Error estándar de la estimación	0,0763
Error promedio	0,0550
Estadístico Durbin-Watson	2,6025 (P=0,2728)

Y la gráfica de las probetas correspondientes a la 2ª fase, es decir las probetas ensayadas en los años 2009 y 2010 con más de 80 días (de 80 a 435 días), que no incluyen las ensayadas a 90 días en la primera fase anteriormente consideradas, son:

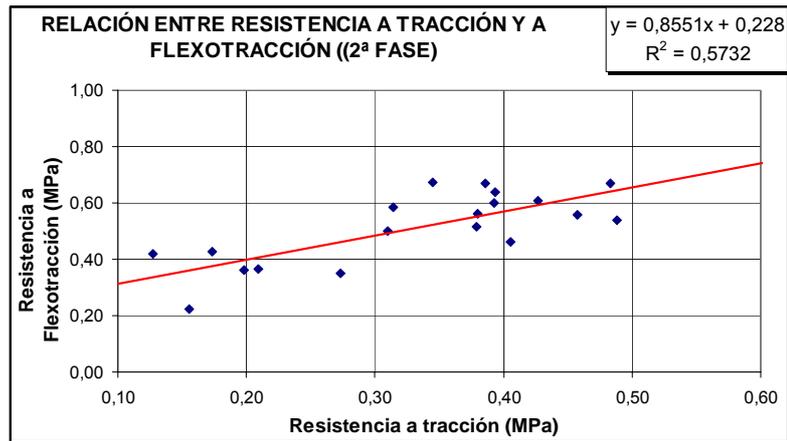


Figura 86. Relación resistencia tracción indirecta – flexotracción en la 2ª fase

Tabla 109. Análisis estadístico del coeficiente resistencia tracción indirecta / flexotracción probetas de la 2ª fase

FLEXOT/ TRACCIÓN 2ª FASE	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	19
Media $R_f/R_{ti}$	1,6545
Varianza	0,2626
Desviación estándar	0,5124
Mínimo	1,101
Máximo	3,292
Rango	2,191
Coefficiente de Asimetría	2,0480
Coefficiente de Curtosis	5,2854

Tabla 110. Análisis estadístico entre las variables  $R_f$  y  $R_{ti}$  probetas de la 2ª fase

R. FLEXOTRACCIÓN – TRACCIÓN IND. PROBETAS 2ª FASE	
Coefficiente de correlación	0,7581
$R^2$	0,5732
Error estándar de la estimación	0,0853
Error promedio	0,0681
Estadístico Durbin-Watson	1,2586 (P=0,0380)

Obteniéndose por último a largo plazo, es decir las probetas ensayadas con más de 80 días, incorporando tanto las de la primera fase, como las de la segunda:

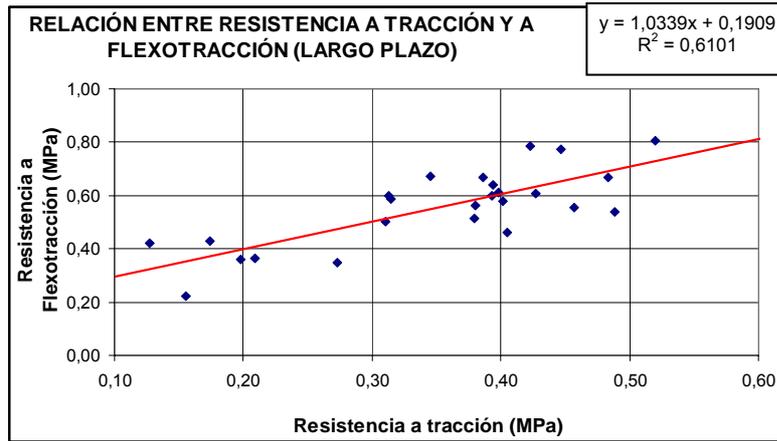


Figura 87. Relación resistencia tracción indirecta – flexotracción a largo plazo

Tabla 111. Análisis estadístico del cociente resistencia tracción indirecta / flexotracción a largo plazo

FLEXOT./ TRACCIÓN L.P.	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	25
Media $R_f/R_{ti}$	1,6588
Varianza	0,2047
Desviación estándar	0,4524
Mínimo	1,101
Máximo	3,292
Rango	2,191
Coefficiente de Asimetría	2,1471
Coefficiente de Curtosis	6,5558

Tabla 112. Análisis estadístico entre las variables  $R_f$  y  $R_{ti}$  a largo plazo

R. FLEXOTRACCIÓN – TRACCIÓN IND. LARGO PLAZO	
Coefficiente de correlación	0,7811
$R^2$	0,6101
Error estándar de la estimación	0,0918
Error promedio	0,0732
Estadístico Durbin-Watson	1,3054 (P=0,0299)

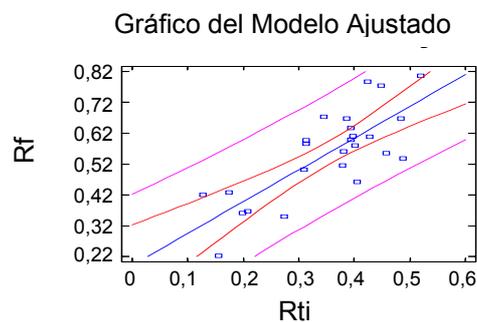


Figura 88. Gráfico de la relación lineal entre resistencia flexotracción – tracción indirecta a largo plazo

En el caso de resultados a largo plazo, existe relación estadísticamente significativa entre  $R_f$  y  $R_{ti}$  para un nivel de confianza del 99%. El estadístico  $R^2$  indica que el modelo explica un 61,01 % de la variabilidad en  $R_f$ . El coeficiente de correlación es igual a 0,781116, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables. El error estándar de la

estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 0,0918324. El error absoluto medio de 0,0732451 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos. Se observa cierto indicio de una posible correlación serial.

En este caso no se observa una similitud en las rectas de tendencia obtenidas para cada edad, como sucedía con la resistencia a compresión. Si consideramos el caso de largo plazo (todas las probetas de más de 80 días de edad ensayadas a tracción indirecta) se obtiene que la relación entre la resistencia a flexotracción y a tracción indirecta resulta:

$$R_{f,LP} = 1,03 R_{ti,LP} + 0,19$$

Y considerando la relación obtenida en los apartados 6.2.2 y 6.3.3 entre la resistencia a tracción indirecta a corto y largo plazo se obtiene:

$$R_{ti,LP} = 1,65 \text{ a } 2 R_{ti,7d}$$

$$R_{f,LP} = 2 R_{ti,7d} + 0,19$$

También existe una relación progresiva entre las resistencias a tracción indirecta y a flexotracción creciendo una con la otra, aunque en este caso la pendiente de la línea de tendencia no aumenta con la edad del ensayo.

Los coeficientes de correlación obtenidos en este caso dejan clara la dependencia que hay entre estas dos variables:

$C_{(7 \text{ días})} =$	0,7340	$R^2 = 0,5462$
$C_{(28 \text{ días})} =$	0,9259	$R^2 = 0,8551$
$C_{(90 \text{ días})} =$	0,7690	$R^2 = 0,5898$
$C_{(2^{\text{a}} \text{ fase})} =$	0,7581	$R^2 = 0,5732$
$C_{(\text{largo plazo})} =$	0,7811	$R^2 = 0,6087$

La evolución de la relación entre ambas resistencias con la edad es:

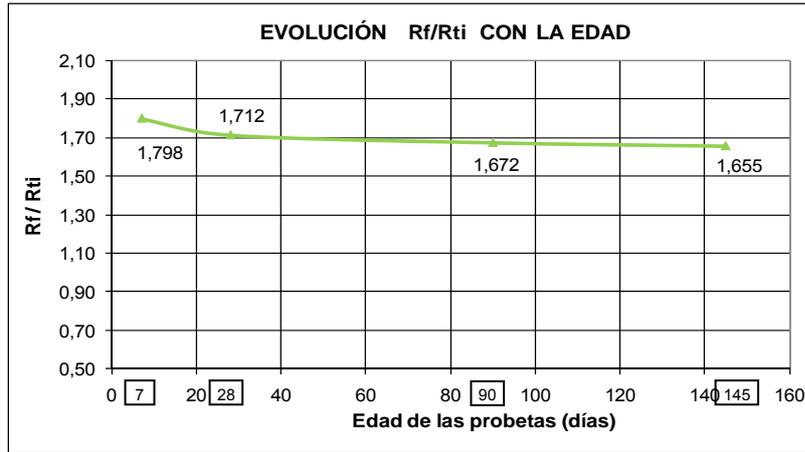


Figura 89. Evolución de la relación resistencia flexotracción – tracción indirecta a diferentes edades

Como puede apreciarse, la evolución de la relación resistencia flexotracción – tracción indirecta es en este caso decreciente al inicio y continúa prácticamente constante posteriormente al aumentar la edad de ensayo.

La relación directa (aunque menos precisa que la obtenida con la ecuación de primer grado) entre la resistencia a flexotracción y a tracción indirecta sería en este caso:

$$R_{f,90d} = 1,7 R_{ti,90d}$$

$$R_{f,LP} = 3,3 R_{ti,7d}$$

Comparando la relación obtenida con las establecidas en las publicaciones consultadas se tiene:

- En el Manual de firmes con capas tratadas con cemento<sup>(18)</sup> del CEDEX – IECA no se establece una relación directa entre la resistencia a tracción indirecta y la de flexotracción pero se puede obtener a través de las relaciones que marca entre estas y la resistencia a compresión. Así, si la resistencia a flexotracción a largo plazo es del orden de 0,17 – 0,25 veces la de compresión a largo plazo y esta es del orden de 10 veces la de tracción indirecta, luego la relación entre la primera y la tercera será de 1,7 a 2,5, lo que coincide en la parte inferior (gravacemento) con la obtenida en los ensayos (1,7).
- En la Norma de secciones de firme de la Comunitat Valenciana<sup>(73)</sup> se establece que la relación entre resistencia a flexotracción y la resistencia a tracción indirecta a largo plazo es del orden de 1,5, por lo que resulta ligeramente inferior a la obtenida.
- En la instrucción de Hormigón Estructural EHE-08<sup>(75)</sup> en su artículo 31 Hormigones, apartado 31.3 características mecánicas, se indica que la resistencia a tracción o a

flexotracción del hormigón deberá determinarse mediante ensayos normalizados, pero en los comentarios se establece la siguiente relación:

$$R_f = 0,9 \cdot R_{ti} \cdot \frac{1 + 1,5 \cdot (h/100)^{0,7}}{1,5 \cdot (h/100)^{0,7}}$$

Si se considera el canto h de 150 mm se obtiene un índice de correlación para el hormigón de 1,35 que es inferior al obtenido para el material reciclado.

- En el Manual de pavimentos industriales<sup>(74)</sup> del IECA se establece para pavimentos de hormigón una correlación entre la resistencia a flexotracción y la resistencia a tracción indirecta de 1,67 que coincide con los índices obtenidos para el material reciclado.

### 6.3.4.3. Relación resistencia a tracción indirecta – resistencia a compresión

Por último, la relación entre la resistencia a tracción indirecta y a compresión a diferentes edades vendrá dada por las siguientes gráficas representadas, en las que se ha calculado las líneas de tendencia. Para la edad de 7 días la gráfica y estudio estadístico son:

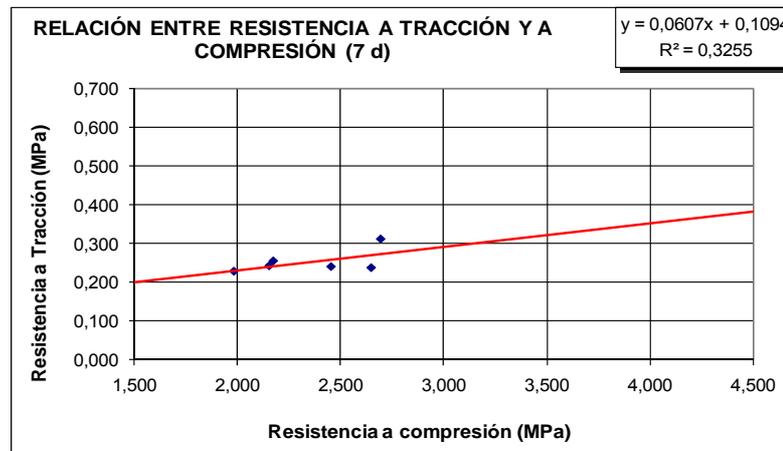


Figura 90. Relación resistencia tracción indirecta – compresión a 7 días

Tabla 113. Análisis estadístico del cociente resistencia tracción indirecta / compresión a 7 días

TRACCIÓN INDIRECTA / COMPRESIÓN 7 DÍAS	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	6
Media $R_{ti}/R_c$	0,1079
Varianza	0,0001
Desviación estándar	0,0115
Mínimo	0,089
Máximo	0,117
Rango	0,028
Coficiente de Asimetría	-1,0973
Coficiente de Curtosis	-0,6385

Tabla 114. Análisis estadístico entre las variables  $R_c$  y  $R_{ti}$  a 7 días

R. COMPRESIÓN – TRACCIÓN IND. 7 DÍAS	
Coefficiente de correlación	0,5734
$R^2$	0,3255
Error estándar de la estimación	0,0284
Error promedio	0,0183
Estadístico Durbin-Watson	1,3346 (P=0,2398)

Para 28 días se obtiene:

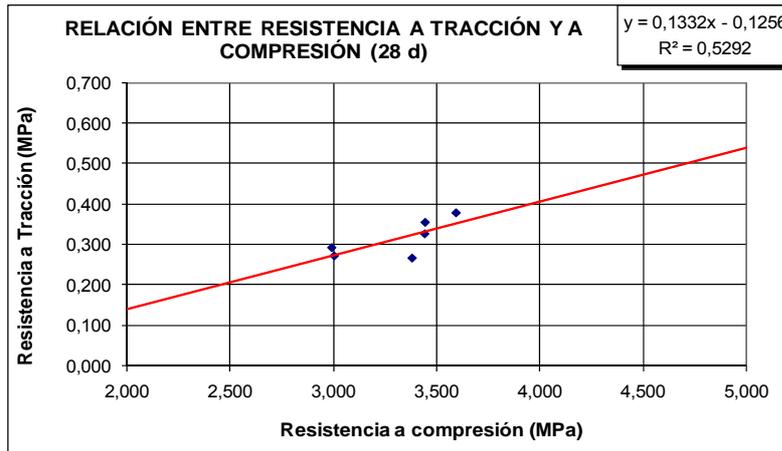


Figura 91. Relación resistencia tracción indirecta – compresión a 28 días

Tabla 115. Análisis estadístico del cociente resistencia tracción indirecta / compresión a 28 días

TRACCIÓN INDIRECTA / COMPRESIÓN 28 DÍAS	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	6
Media $R_{ti}/R_c$	0,0950
Varianza	0,0001
Desviación estándar	0,0097
Mínimo	0,079
Máximo	0,105
Rango	0,027
Coefficiente de Asimetría	-0,9227
Coefficiente de Curtosis	0,7355

Tabla 116. Análisis estadístico entre las variables  $R_c$  y  $R_{ti}$  a 28 días

R. COMPRESIÓN – TRACCIÓN IND. 28 DÍAS	
Coefficiente de correlación	0,7289
$R^2$	0,5292
Error estándar de la estimación	0,0354
Error promedio	0,0225
Estadístico Durbin-Watson	3,0208 (P=0,0073)

Y para 90 días la gráfica, línea de tendencia y análisis estadístico resultan:

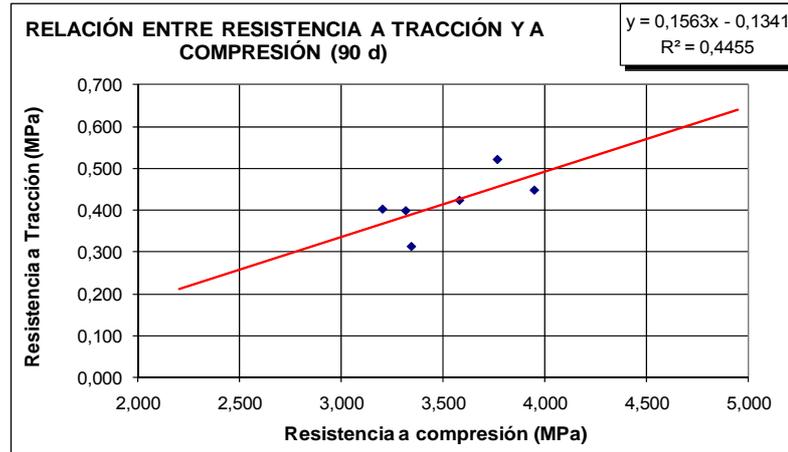


Figura 92. Relación resistencia tracción indirecta – compresión a 90 días

Tabla 117. Análisis estadístico del cociente resistencia tracción indirecta / compresión a 90 días

TRACCIÓN INDIRECTA / COMPRESIÓN 90 DÍAS	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	6
Media $R_{ti}/R_c$	0,1181
Varianza	0,0002
Desviación estándar	0,0147
Mínimo	0,094
Máximo	0,138
Rango	0,045
Coefficiente de Asimetría	-0,6035
Coefficiente de Curtosis	1,5876

Tabla 118. Análisis estadístico entre las variables  $R_c$  y  $R_{ti}$  a 90 días

R. COMPRESIÓN – TRACCIÓN IND. 90 DÍAS	
Coefficiente de correlación	0,6672
$R^2$	0,4455
Error estándar de la estimación	0,0564
Error promedio	0,0381
Estadístico Durbin-Watson	3,0375 (P=0,1153)

En el caso denominado 2ª fase, es decir las probetas ensayadas en los años 2009 y 2010 con más de 80 días, que no incluyen las ensayadas a 90 días en la primera fase anteriormente consideradas, se obtiene:

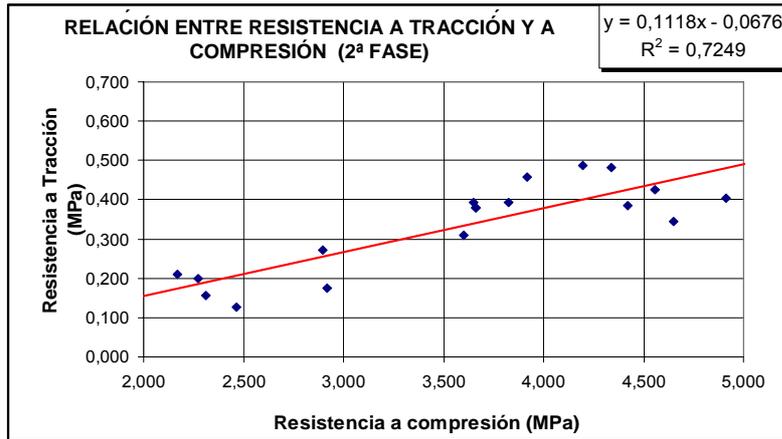


Figura 93. Relación resistencia tracción indirecta – compresión en las probetas de la 2ª fase

Tabla 119. Análisis estadístico del cociente resistencia tracción indirecta / compresión probetas de la 2ª fase

TRACCIÓN INDIRECTA / COMPRESIÓN 2ªFASE	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	18
Media $R_{ti}/R_c$	0,0912
Varianza	0,0004
Desviación estándar	0,0188
Mínimo	0,052
Máximo	0,117
Rango	0,065
Coficiente de Asimetría	-0,6266
Coficiente de Curtosis	-0,2703

Tabla 120. Análisis estadístico entre las variables  $R_c$  y  $R_{ti}$  probetas de la 2ª fase

R. COMPRESIÓN – TRACCIÓN IND. 2ª FASE	
Coficiente de correlación	0,8518
$R^2$	0,7249
Error estándar de la estimación	0,0624
Error promedio	0,0516
Estadístico Durbin-Watson	0,9420 (P=0,0053)

Y por último a largo plazo, es decir las probetas ensayadas con más de 80 días (de 80 a 435 días), incorporando tanto las de la primera fase, como las de la segunda, el modelo resulta:

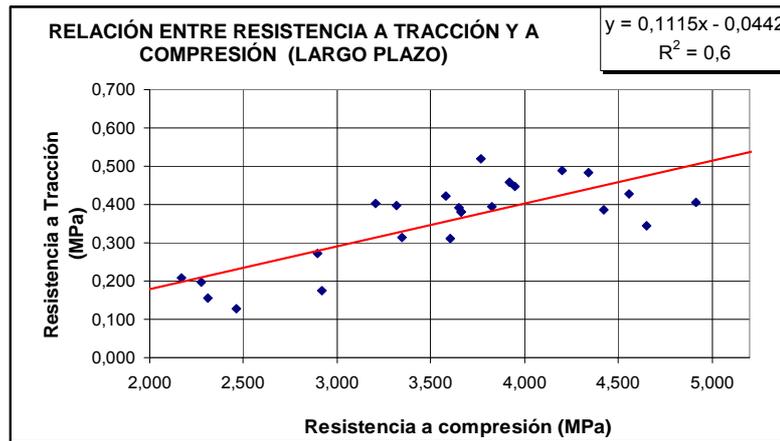


Figura 94. Relación resistencia tracción indirecta – compresión a largo plazo

Tabla 121. Análisis estadístico del cociente resistencia tracción indirecta / compresión a largo plazo

TRACCIÓN INDIRECTA / COMPRESIÓN L.P.	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	24
Media $R_{ti}/R_c$	0,0979
Varianza	0,0004
Desviación estándar	0,0212
Mínimo	0,052
Máximo	0,138
Rango	0,086
Coefficiente de Asimetría	-0,4068
Coefficiente de Curtosis	-0,0902

Tabla 122. Análisis estadístico entre las variables  $R_c$  y  $R_{ti}$  a largo plazo

R. COMPRESIÓN – TRACCIÓN IND. LARGO PLAZO	
Coefficiente de correlación	0,7747
$R^2$	0,6000
Error estándar de la estimación	0,0716
Error promedio	0,0555
Estadístico Durbin-Watson	0,8609 (P=0,0008)

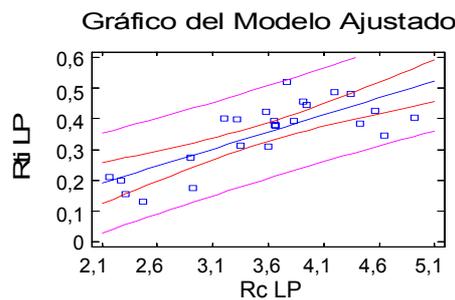


Figura 95. Gráfico de la relación lineal entre resistencia tracción indirecta - compresión a largo plazo

Existe relación estadísticamente significativa entre la resistencia a tracción indirecta y la resistencia a compresión a largo plazo para un nivel de confianza del 99%. El estadístico  $R^2$  indica que el modelo explica un 60 % de la variabilidad en la resistencia a tracción indirecta. El coeficiente de correlación es igual a 0,774704, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de

los residuos que es 0,0716512. Este valor puede usarse para construir límites de la predicción para las nuevas observaciones. El error absoluto medio de 0,0565343 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson indica que hay indicio de una posible correlación serial.

Analizando los resultados obtenidos a largo plazo (años 2007 a 2010) y en la segunda fase (años 2009 y 2010) prácticamente se corrobora el valor obtenido en el apartado 6.2.3 con probetas cilíndricas, estableciéndose la relación:

$$R_{ti,LP} = 0,1 R_{c,LP}$$

Como en casos anteriores, existe una relación directa entre ambas resistencias compresión y tracción indirecta, aumentando una con la otra. Las líneas de tendencia tienen mayor pendiente a medida que aumenta la edad en los resultados obtenidos en la primera fase, pero esto se distorsiona en la segunda etapa.

Los coeficientes de correlación obtenidos en este caso dejan clara la dependencia que hay entre estas dos variables:

$C_{(7 \text{ días})} =$	0,5734	$R^2 =$	0,3255
$C_{(28 \text{ días})} =$	0,7299	$R^2 =$	0,5292
$C_{(90 \text{ días})} =$	0,6672	$R^2 =$	0,4455
$C_{(2^a \text{ fase})} =$	0,8518	$R^2 =$	0,7249
$C_{(\text{largo plazo})} =$	0,7743	$R^2 =$	0,6000

Y la evolución de la relación entre ambas resistencias con la edad queda recogida en la siguiente gráfica, de estructura similar a la evolución entre la resistencia a compresión y flexotracción.

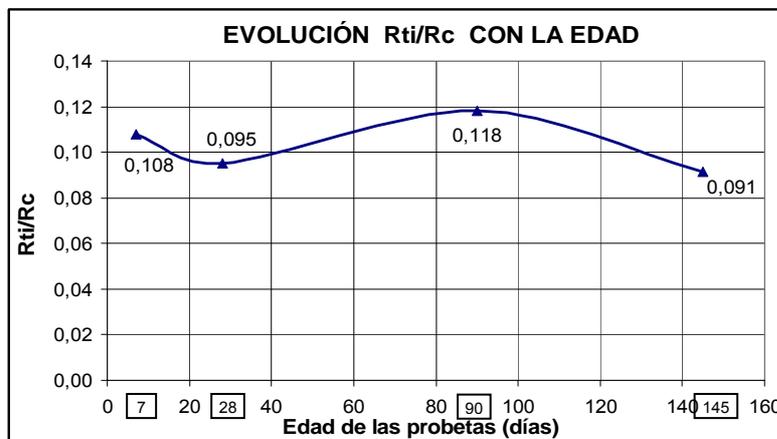


Figura 96. Evolución de la relación resistencia tracción indirecta - compresión a diferentes edades

Como puede observarse la evolución de la relación resistencia tracción indirecta – compresión en este caso (mitades de probetas prismáticas rotas a flexotracción) es muy diferente a la obtenida con las probetas cilíndricas (apartado 6.2.3.). Para mayor claridad, estos resultados se recogen en una tabla para compararlos con los que se obtuvieron con las probetas cilíndricas (apartado 6.2.3.):

Tabla 123. Relación resistencia compresión – tracción indirecta para diversas probetas

Edades de las probetas	Probeta cilíndrica		Probeta prismática	
	Nº datos	$R_{ti}/R_c$	Nº datos	$R_{ti}/R_c$
7 días	8	0,073	12	0,108
28 días	5	0,082	12	0,095
90 días	14	0,099	12	0,118

#### **6.4. COMPARATIVA RESULTADOS PROBETAS CILÍNDRICAS – PRISMÁTICAS**

Los resultados obtenidos de resistencia media a compresión sobre probeta cilíndrica de Ø 15,24 x 17,78 cm y sobre los medios prismas obtenidos tras la rotura de la probeta a flexotracción son los siguientes:

Tabla 124. Resultados de resistencia de probetas cilíndricas y prismáticas

Días de curado	Resistencia media a compresión (MPa)	
	CILÍNDRICA	PRISMÁTICA
7	2,617	2,351
28	3,168	3,309
90	3,960 (4,030)	3,735 (3,870)
Δ 7-90	1,52	1,59

( ) discretizando un resultado

De una forma gráfica se observa bien los mejores resultados obtenidos en la probeta cilíndrica en el ensayo de compresión.

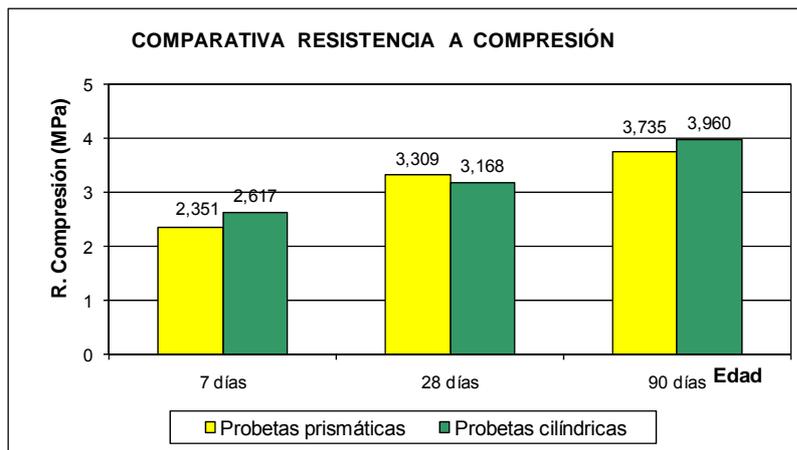


Figura 97. Comparativa de resistencia a compresión entre probetas cilíndricas y prismáticas

La valoración estadística de los resultados obtenidos a 7 y 90 días (que es la mayor edad a la que se ensayaron las probetas cilíndricas) se recoge en las siguientes tablas:

Tablas 125 y 126. Análisis estadístico de las resistencias a compresión a 7 y 90 días con probetas cilíndricas y prismáticas

RESISTENCIA A COMPRESIÓN 7 DÍAS		
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS		
ESTADÍSTICOS	Cilíndricas	Prismáticas
Número	6	6
Media	2,6175	2,3511
Varianza	0,1924	0,0844
Desviación estándar	0,4386	0,2905
Mínimo	2,091	1,983
Máximo	3,122	2,694
Rango	1,031	0,711
Coficiente de Asimetría	-0,0182	0,0546
Coficiente de Curtosis	-2,6195	-2,0680

RESISTENCIA A COMPRESIÓN 90 DÍAS		
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS		
ESTADÍSTICOS	Cilíndricas	Prismáticas
Número	8	9
Media	3,9603	3,7354
Varianza	0,1373	0,1615
Desviación estándar	0,3705	0,4019
Mínimo	3,472	3,203
Máximo	4,493	4,340
Rango	1,021	1,137
Coficiente de Asimetría	0,4133	0,1290
Coficiente de Curtosis	-1,0178	-1,3070

En el caso de resistencia a tracción indirecta, los resultados obtenidos sobre probeta cilíndrica de Ø 15,24 x 17,78 cm y sobre los medios prismas obtenidos tras la rotura de la probeta a flexotracción son los siguientes:

Tabla 127. Resultados de resistencia a tracción indirecta de probetas cilíndricas y prismáticas

Días de curado	Resistencia media a tracción indirecta (MPa)	
	CILÍNDRICA	PRISMÁTICA
7	0,190	0,252
28	0,259	0,315
90	0,391	0,437
$\Delta$ 7-90	2,06	1,73

En los ensayos de tracción indirecta sucede lo contrario que en los de compresión, obteniéndose claramente mejores resultados sobre los medios prismas obtenidos tras la rotura de la probeta a flexotracción:

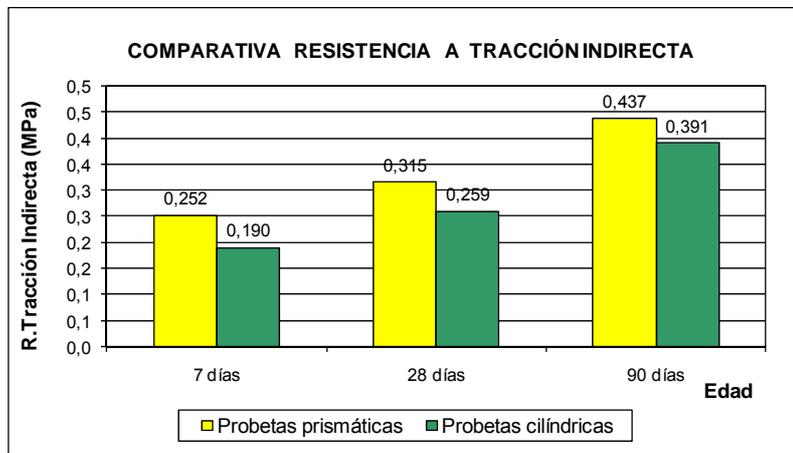


Figura 98. Comparativa de resistencia a tracción indirecta entre probetas cilíndricas y prismáticas

Tabla 128. Análisis estadístico de las resistencias a tracción indirecta a 90 días con probetas cilíndricas y prismáticas

RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA 90 DÍAS		
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS		
ESTADÍSTICOS	Cilíndricas	Prismáticas
Número	6	9
Media	0,3907	0,4367
Varianza	0,0028	0,0038
Desviación estándar	0,0534	0,0617
Mínimo	0,323	0,313
Máximo	0,459	0,520
Rango	0,136	0,207
Coficiente de Asimetría	0,3552	-0,8065
Coficiente de Curtosis	-1,4030	0,9425

La representación gráfica de la relación entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción indirecta para cada tipología de probeta es:

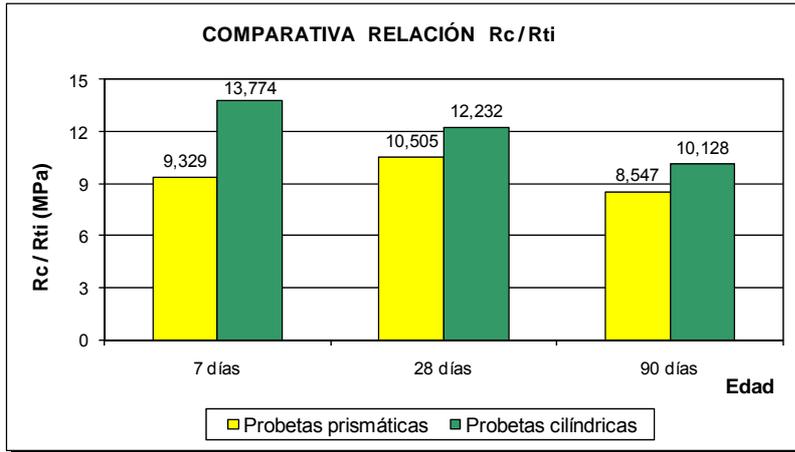


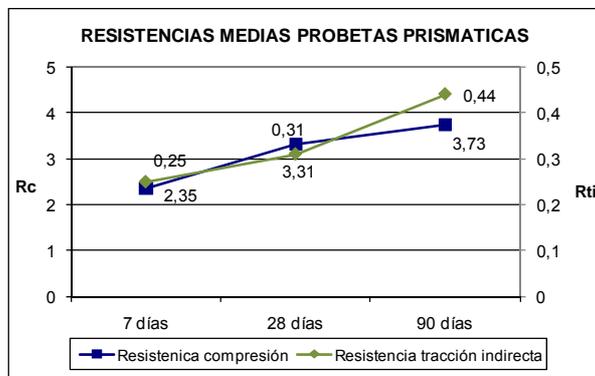
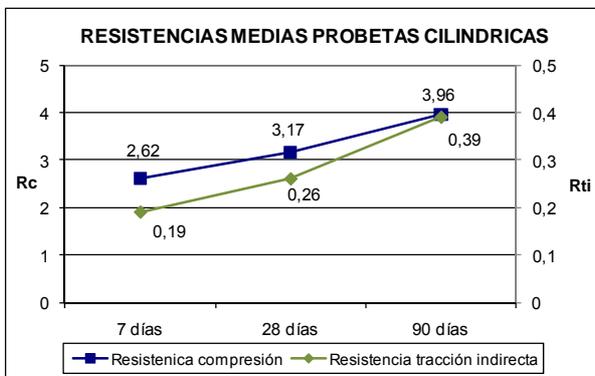
Figura 99. Relación  $R_c/R_{ti}$  para probetas cilíndricas y prismáticas

Por último se incluye una tabla resumen y su representación gráfica de todas las resistencias obtenidas a flexotracción, a compresión y a tracción indirecta, tanto de las probetas cilíndricas, como de los medios prismas resultado de las roturas a flexotracción:

Tabla 129. Resumen de los resultados de resistencia obtenidos

Edad	7 días		28 días		90 días		Largo plazo		Coeficiente $\Delta$ 7-90 días	
	Cilíndrica	Prismática o mitades	Cilíndrica	Prismática o mitades	Cilíndrica	Prismática o mitades	Cilíndrica	Prismática o mitades	Cilíndrica	Prismática o mitades
Resistencia a compresión	2,62	2,35	3,17	3,31	3,96 (4,03)	3,73 (4,15)		4,13 (4,81)	1,5	1,5*
Resistencia a tracción indirecta	0,19	0,25	0,26	0,31	0,39	0,44 (0,47)			2	1,7
Resistencia a flexotracción		0,45		0,53		0,69 (0,59)				1,5

( ) valor discretizando \* a largo plazo el coeficiente puede llegar a 2



Figuras 100 y 101. Resistencias medias obtenidas con probetas cilíndricas y prismáticas

## 6.5. PROBETAS PRISMÁTICAS. ENSAYOS DINÁMICOS A FATIGA

### 6.5.1. Ensayos dinámicos de rotura a fatiga

En la primera etapa de los trabajos se fabrican 58 probetas prismáticas de las que se ensayan a fatiga 22, correspondiendo a las series denominadas FG1.1 a 1.6, FG2.1 a 2.6, FG3.1 a 3.6, FG4.3, 4.5 y 4.6 y FG5.2. En la segunda fase, se fabrican 48 probetas, de las que se ensayan a fatiga 33, con las denominaciones FG6.x, FG7.x, FG8.x, FG9.x, FG10.x y FG11.x (los valores correspondientes a x se pueden observar en la tabla A2.19 del anejo 2 o en las siguientes tablas de este apartado). A estas 55 probetas hay que añadir 2 de las empleadas en el estudio realizado para definir el protocolo de fabricación (AP7.1 y AP7.2) y deducir las siguientes: 3 que rompieron nada más ponerlas en carga pues tenían algún hueco interno defecto de fabricación (FG1.2, FG2.4 y FG4.3), una no contabilizada que después de 3 semanas y más de 20 millones de ciclos de carga sin mostrar ninguna fisura, se retiró de la prensa y se rompió a flexotracción (FG6.11) y otras 2 que extrañamente desaparecieron de la cámara de curado y nadie del laboratorio sabe nada de lo que ha sucedido con ellas (FG6.17 y FG6.18). Esto arroja un total de 52 ensayos de fatiga llevados a buen fin.

Los datos de estas probetas se incluyen en la tabla A2.19 del anejo 2, donde se incluye junto a la fecha de fabricación, las características de cada probeta (peso, densidad, etc).

Inicialmente se pretendía repartir homogéneamente las probetas en los tres grupos de carga previstos, que son:

G1 = carga máxima – mínima = 50 – 25% tensión de rotura

G2 = carga máxima – mínima = 65 – 30% tensión de rotura

G3 = carga máxima – mínima = 80 – 40% tensión de rotura

ahora bien, el elevado número de ciclos necesarios para romper las probetas en el grupo G1, y en algún caso en el G2, que obligaba a ocupar la prensa dinámica durante semanas (31 días en el caso de la probeta FG2.3) obligó a replantear la actuación prevista, ensayando un mayor número de probetas en los grupos G2 y sobre todo G3.

En las probetas fabricadas en la primera fase (años 2007 y 2008), aunque se rompieron a fatiga en los años 2008 y 2009, se consideró como tensión de rotura 0,69 MPa obtenidos de valor medio de resistencia a flexotracción a los 90 días en dicha primera fase. El período de madurez de estas probetas varía desde 137 días hasta 438 días.

Las probetas fabricadas en la segunda fase (año 2009) y rotas entre los años 2009 y 2010 resultaron con una resistencia a flexotracción inferior, variable entre 0,59 y 0,63 (aunque las probetas FG4.1, 4.2 y 4.4 ensayadas a 435 días rompieron con solo 0,44 MPa y las FG5.1 y FG6.8 ensayadas a 100 días, rompieron con 0,3 MPa).

La citada heterogeneidad de las características del material empleado en la segunda fase introduce así una nueva variable en los ensayos a fatiga: determinar la tensión máxima de rotura de cada probeta, que se corresponde con su resistencia a flexotracción.

Para resolver esta situación se empezó a romper a flexotracción la primera de las dos probetas que se fabricaba en cada amasada, ensayando a fatiga la segunda con este valor de tensión de rotura. Así, se ensayó a flexotracción las probetas FG5.1, 6.1, 6.3, 6.5, ..., hasta que se observó que, debido a alguna razón no determinada en el proceso, la primera de las probetas prismáticas fabricadas tenía mejor apariencia en su interior al romper y daba una ligera mayor resistencia que la segunda (quizás porque la segunda se fabricaba con más finos posiblemente depositados en el fondo del carretillo sobre el que vertía la amasadora y del que se cogía el material para llenar los moldes). Entonces se empezó a alternar la rotura a flexotracción de la segunda probeta de la serie, en lugar de la primera (FG6.8, 10.4, 10.6, ...). Pero esta situación también se modificó posteriormente ensayando más probetas a fatiga que a flexotracción para disponer de más datos de número de aplicaciones de carga soportadas antes de agotarse el material a fatiga.

Por todo ello la tensión de rotura introducida en la prensa dinámica en las probetas ensayadas en la segunda fase fue variable, considerando la resistencia a flexotracción obtenida en la otra probeta del par fabricado con la misma amasada cuando se ensayaba una de la pareja (probetas FG5.2 a 6.9 y FG10.2 a 11.2) y el valor de 0,60 MPa o 0,69 MPa en los casos restantes. En algún caso incluso hubo que estimar dicha carga de rotura.

Los datos citados se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 130. Datos de las probetas prismáticas ensayadas a fatiga

Probeta nº	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Días de curado	Fecha inicio ensayo	Frecuencia (Hz)	Carga teórica	Carga inicial (KN)	Carga final (KN)	Tensión de rotura Rf (MPa)
AP7.1	2,0389	50	06/06/2008	5	G1 (50-25%)	1,299-2,598	0,940-1,960	0,69
AP7.2	2,0265	57	13/06/2008	4	G2 (65-30%)	1,54-3,26	1,02-2,30	0,69
FG1.1	2,1312	155	17/06/2008	4	G3 (80-40%)			0,69
FG1.2	2,1105	156	18/06/2008	0	G3 (80-40%)			0,69
FG1.3	2,0637	157	19/06/2008	7	G3 (80-40%)	2-4,10		0,69
FG1.4	2,0899	158	20/06/2008	7	G3 (80-40%)	2,01-4,10	2,02-4,09	0,69
FG1.5	2,0885	205	06/08/2008	7	G1 (50-25%)	1,24-2,54	1,24-2,54	0,69
FG1.6	2,0720	206	07/08/2008	7	G2 (65-30%)	1,50-3,31	1,50-3,31	0,69
FG2.1	2,0995	137	20/06/2008	7	G2 (65-30%)	1,50-3,32	1,50-3,32	0,69
FG2.2	2,1077	186	08/08/2008	7	G2 (65-30%)	1,503-3,315	1,50-3,315	0,69
FG2.3	2,0582	189	11/08/2008	7	G1 (50-25%)	1,24-2,54	1,24-2,54	0,69
FG2.4	2,0582	294	24/11/2008	7	G1 (50-25%)	1,24-2,47	1,32-2,45	0,69
FG2.5	2,0637	169	22/07/2008	7	G3 (80-40%)	2,02-4,09	2,02-4,09	0,69
FG2.6	2,0444	183	05/08/2008	7	G3 (80-40%)	2,54-3,60	2,02-4,09	0,69
FG3.1	2,0843	275	26/11/2008	7	G1 (50-25%)	1,24-2,54	1,24-2,54	0,69
FG3.2	2,0843	284	05/12/2008	7	G1 (50-25%)	1,24-2,54	1,24-2,54	0,69
FG3.3	2,0403	329	19/01/2009	7	G2 (65-30%)	1,50-3,31	1,50-3,31	0,69
FG3.4	2,0582	333	23/01/2009	7	G2 (65-30%)	1,50-3,31	1,50-3,31	0,69
FG3.5	2,0802	327	17/01/2009	7	G3 (80-40%)	2,01-4,10	2,01-4,10	0,69
FG3.6	2,0857	479	18/06/2009	7	G3 (80-40%)	1,17-3,59	0,576-3,439	0,69
FG4.3	2,0609	435	30/06/2009	7	G3 (80-40%)			0,69
FG4.5	2,0788	438	03/07/2009	7	G3 (80-40%)	2,15-4,00	2,08-4,05	0,69

Probeta n°	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Días de curado	Fecha inicio ensayo	Frecuencia (Hz)	Carga teórica	Carga inicial (KN)	Carga final (KN)	Tensión de rotura R <sub>f</sub> (MPa)
FG4.6	2,0554	438	03/07/2009	7	G2 (65-30%)	1,54-3,25	1,53-3,25	0,69
FG5.2	2,0802	103	20/10/2009	7	G3 (80-40%)	0,989 -2,087	1,11-1,97	0,366
FG6.2	2,0954	79	30/09/2009	7	G3 (80-40%)	1,50-3,31	1,50-3,31	0,538
FG6.4	2,0114	80	02/10/2009	7	G2 (65-30%)	1,391-3,142	1,36-3,10	0,667
FG6.6	2,0582	84	06/10/2009	7	G3 (80-40%)	1,397-2,897	1,52-2,72	0,500
FG6.7	2,1807	100	22/10/2009	7	G3 (80-40%)	0,554-1,217	0,57-1,13	0,221
FG6.9	2,1532	126	17/11/2009	7	G2 (65-30%)	1,326-3,001	1,33-2,92	0,638
FG6.11	2,1477	132	23/11/2009	7	G2 (65-30%)			0,69
FG6.13	2,0967	178	08/01/2010	7	G3 (80-40%)	2,03-3,91	3,35-3,55	0,69
FG6.14	1,9880	178	08/01/2010	7	G3 (80-40%)	1,38-2,88	1,39-2,89	0,60
FG6.15	2,1367	181	11/01/2010	7	G3 (80-40%)	--	--	0,69
FG6.16	2,0541	182	12/01/2010	7	G3 (80-40%)	--	--	0,60
FG7.1	2,0664	175	12/01/2010	7	G3 (80-40%)	2,35-2,37	2,35-2,37	0,69
FG7.3	2,1752	176	13/01/2010	7	G3 (80-40%)	2,21-3,76	2,00-3,95	0,69
FG7.4	2,2014	176	13/01/2010	7	G3 (80-40%)	2,00-3,22	1,68-3,44	0,60
FG8.1	2,1546	177	15/01/2010	7	G3 (80-40%)	2,43-3,50	2,43-3,73	0,69
FG8.3	2,0733	177	15/01/2010	7	G3 (80-40%)	2,30-3,70	2,37-3,54	0,69
FG8.4	2,1738	180	18/01/2010	7	G3 (80-40%)	2,77-2,96	1,65-3,44	0,60
FG8.5	2,1573	180	18/01/2010	7	G3 (80-40%)	2,28-3,69	2,02-4,01	0,69
FG8.6	2,1435	180	18/01/2010	7	G3 (80-40%)	2,06-3,16	1,80-3,21	0,60
FG9.2	2,0637	200	08/02/2010	7	G2 (65-30%)	1,23-2,70	1,24-2,74	0,60
FG9.3	2,0830	182	21/01/2010	7	G3 (80-40%)	2,46-3,47	2,06-3,98	0,69
FG9.5	2,0981	182	21/01/2010	7	G3 (80-40%)	1,98-3,77	1,98-3,77	0,69
FG9.6	2,1367	183	22/01/2010	7	G3 (80-40%)	1,67-3,31	1,70-3,46	0,60
FG9.7	2,0830	195	03/02/2010	7	G2 (65-30%)	1,36-3,08	1,45-3,17	0,69
FG9.8	2,1160	183	22/01/2010	7	G3 (80-40%)	2,02-3,09	1,71-3,43	0,60
FG9.9	2,0899	194	02/02/2010	7	G2 (65-30%)	1,32-3,05	1,47-3,19	0,69
FG9.10	2,1256	196	04/02/2010	7	G2 (65-30%)	1,25-2,72	1,24-2,73	0,60
FG10.2	2,0912	119	14/04/2010	7	G2 (65-30%)	1,17-2,61	1,18-2,62	0,561
FG10.3	2,0830	127	22/04/2010	7	G2 (65-30%)	1,10-2,45	1,12-2,47	0,538
FG10.5	2,1256	139	04/05/2010	7	G2 (65-30%)	1,42-3,05	1,51-3,08	0,667
FG11.2	2,1229	93	20/05/2010	8	G2 (65-30%)	1,16-2,80	1,27-2,69	0,60
FG11.3	2,1972	106	02/06/2010	9	G3 (80-40%)	1,78-3,43	1,73-3,43	0,60
FG11.4	2,1931	108	04/06/2010	10	G2 (65-30%)	1,31-2,73	1,34-2,76	0,60

Las probetas se han ensayado en la prensa dinámica descrita en el apartado 4.2.10 con una carga sinusoidal cuyo valor máximo y mínimo viene marcado por el grupo de carga en el que se ensaya y la tensión de rotura R<sub>f</sub> adoptada.

La fuerza máxima y mínima que se introduce en el ordenador de la prensa para aplicar en el actuador se calcula para cada caso de carga máxima. Cuando se considera carga máxima 0,69 MPa el grupo de carga a introducir es el siguiente:

Tabla 131. Fuerzas máxima y mínima a introducir en la prensa dinámica para carga máx = 0.69 MPa

	Tensión máx MPa	Tensión mín MPa	Fuerza máx actuador (kN)	Fuerza mín actuador (kN)	
Grupo 1 (50-25%)	0,346	0,173	2,540	1,240	Primeros ensayos con rodillos de 6 kg
Grupo 2 (65-30%)	0,450	0,208	3,310	1,500	
Grupo 3 (80-40%)	0,554	0,277	4,090	2,017	
			2,563	1,264	Resto ensayos con rodillos 3,5 kg
			3,342	1,524	
			4,122	2,043	

Con las fuerzas calculadas aplicadas en el actuador de la prensa para que la carga de rotura en todo el tercio central de la probeta sea constante y de valor variable sinusoidalmente entre los porcentajes máximo y mínimo de la carga de rotura indicados para cada grupo, se ensayan las probetas en la prensa dinámica hasta su rotura por fatiga. Mientras que algunas de las probetas duran unas pocas horas, otras sin embargo llegan a aguantar semanas con la carga durante el día y la noche. El número de ciclos de carga que soporta cada probeta está incluido en la siguiente tabla:

Tabla 132. Número de ciclos de carga soportado por cada probeta a fatiga

Probeta nº	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Días de curado	Carga teórica	Tensión de rotura Rf (MPa)	Tiempo (h)	Desplazamiento inicial (mm)	Desplazamiento final (mm)	Nº de ciclos
AP7.1	2,0389	50	G1 (50-25%)	0,69	180,56			3.250.000
AP7.2	2,0265	57	G2 (65-30%)	0,69	93,06			1.340.000
FG1.1	2,1312	155	G3 (80-40%)	0,69	0,01			74
FG1.2	2,1105	156	G3 (80-40%)	0,69	0,00			0 (en carga)
FG1.3	2,0637	157	G3 (80-40%)	0,69	4,15			104.534
FG1.4	2,0899	158	G3 (80-40%)	0,69	0,53	40,809-40,977	40,842-40,974	13.473
FG1.5	2,0885	205	G1 (50-25%)	0,69	20,29	40,486-40,587	40,571-40,674	511.365
FG1.6	2,0720	206	G2 (65-30%)	0,69	0,28	41,536-41,661	41,563-41,687	7.042
FG2.1	2,0995	137	G2 (65-30%)	0,69	201,59	40,199-40,315	40,336-40,467	5.080.000
FG2.2	2,1077	186	G2 (65-30%)	0,69	43,57	40,336-40,451	40,395-40,512	1.097.880
FG2.3	2,0582	189	G1 (50-25%)	0,69	740,04	40,043-40,125	40,157-40,157	18.648.940
FG2.4	2,0582	294	G1 (50-25%)	0,69	11,85	41,472-41,576	41,123-41,232	298.501
FG2.5	2,0637	169	G3 (80-40%)	0,69	99,81	40,724-40,857	40,802-40,954	2.515.244
FG2.6	2,0444	183	G3 (80-40%)	0,69	0,13	41,6498-41,839	41,701-41,834	3.217
FG3.1	2,0843	275	G1 (50-25%)	0,69	209,74	40,484-40,55	51,404-51,476	5.285.353
FG3.2	2,0843	284	G1 (50-25%)	0,69	455,85	51,001-51,078	51,044-51,159	11.487.356
FG3.3	2,0403	329	G2 (65-30%)	0,69	0,92	51,587-51,677	50,678-50,806	23.157
FG3.4	2,0582	333	G2 (65-30%)	0,69	455,42	51,940-52,076	51,935-52,086	11.476.510
FG3.5	2,0802	327	G3 (80-40%)	0,69	865,05	50,628-50,784	50,826-50,951	21.799.325
FG3.6	2,0857	479	G3 (80-40%)	0,69	0,05	40,684-40,855	40,603-40,848	1.357
FG4.3	2,0609	435	G3 (80-40%)	0,69	0,00			0 (en carga)
FG4.5	2,0788	438	G3 (80-40%)	0,69	0,40	49,702-49,831	49,808-49,942	10.108
FG4.6	2,0554	438	G2 (65-30%)	0,69	0,08	50,683-50,804	50,689-50,807	2.011
FG5.2	2,0802	103	G3 (80-40%)	0,366	0,03	48,563-48,661	48,554-48,610	868
FG6.2	2,0954	79	G3 (80-40%)	0,538	0,51	41,543-41,667	48,788-48,900	12.884
FG6.4	2,0114	80	G2 (65-30%)	0,667	1,37	48,560-48,693	48,590-48,711	34.589
FG6.6	2,0582	84	G3 (80-40%)	0,50	0,06	48,398-48,399	48,316-48,412	1.561
FG6.7	2,1807	100	G3 (80-40%)	0,221	0,12	46,267-46,285	46,294-46,346	2.913
FG6.9	2,1532	126	G2 (65-30%)	0,638	16,91	48,477-48,574	48,527-48,623	426.140
FG6.11	2,1477	132	G2 (65-30%)	0,69	519,71			13.096.690
FG6.13	2,0967	178	G3 (80-40%)	0,69	2,35	49,139-49,249	49,190-49,201	59.306
FG6.14	1,9880	178	G3 (80-40%)	0,60	83,49	50,273-50,369	50,419-50,513	2.103.978
FG6.15	2,1367	181	G3 (80-40%)	0,69	0,01	--	--	42
FG6.16	2,0541	182	G3 (80-40%)	0,60	0,01	--	--	74
FG7.1	2,0664	175	G3 (80-40%)	0,69	0,01	49,549-49,561	49,559-49,637	48
FG7.3	2,1752	176	G3 (80-40%)	0,69	0,01	50,184-50,274	50,212-50,325	123
FG7.4	2,2014	176	G3 (80-40%)	0,60	0,05	49,175-49,255	49,254-49,358	1.245
FG8.1	2,1546	177	G3 (80-40%)	0,69	0,60	49,881-49,933	49,880-49,955	15.179
FG8.3	2,0733	177	G3 (80-40%)	0,69	0,04	50,796-50,880	50,893-50,968	1.126
FG8.4	2,1738	180	G3 (80-40%)	0,60	10,09	50,153-50,164	50,186-50,308	254.205
FG8.5	2,1573	180	G3 (80-40%)	0,69	0,04	50,116-50,197	50,196-50,322	1.052
FG8.6	2,1435	180	G3 (80-40%)	0,60	0,11	48,407-48,504	48,515-48,606	2.849
FG9.2	2,0637	200	G2 (65-30%)	0,60	0,86	49,249-49,345	49,277-49,381	21.555
FG9.3	2,0830	182	G3 (80-40%)	0,69	0,01	49,593-49,683	49,560-49,671	129
FG9.5	2,0981	182	G3 (80-40%)	0,69	0,01	50,368-50,439	50,368-50,439	64
FG9.6	2,1367	183	G3 (80-40%)	0,60	0,30	48,663-48,760	48,684-48-784	7.567
FG9.7	2,0830	195	G2 (65-30%)	0,69	2,79	49,156-49,256	49,163-49,262	70.348
FG9.8	2,1160	183	G3 (80-40%)	0,60	0,06	49,425-49,503	49,470-49,574	1.579

Probeta n°	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Días de curado	Carga teórica	Tensión de rotura Rf (MPa)	Tiempo (h)	Desplazamiento inicial (mm)	Desplazamiento final (mm)	N° de ciclos
FG9.9	2,0899	194	G2 (65-30%)	0,69	11,62	49,892-49,999	49,815-49,926	292.855
FG9.10	2,1256	196	G2 (65-30%)	0,60	72,15	49,761-49,848	49,857-49,951	1.818.254
FG10.2	2,0912	119	G2 (65-30%)	0,561	95,41	49,742-49,841	49,851-49,947	2.404.230
FG10.3	2,0830	127	G2 (65-30%)	0,5385	253,97	48,391-48,489	48,671-48,760	6.400.000
FG10.5	2,1256	139	G2 (65-30%)	0,669	96,51	49,436-49,542	49,478-49,576	2.432.106
FG11.2	2,1229	93	G2 (65-30%)	0,60	7,55	50,088-50,187	50,070-50,155	217.296
FG11.3	2,1972	106	G3 (80-40%)	0,60	1,27	48,061-48,187	48,068-48,190	41.102
FG11.4	2,1931	108	G2 (65-30%)	0,60	1,97	49,648-49,771	49,619-49,731	70.943

### 6.5.2. Ensayos de rotura a compresión de las medias probetas ensayada a fatiga

De manera similar a las probetas prismáticas rotas a flexotracción, una de las dos mitades de la probeta ensayada a fatiga se rompe a compresión simple. A la mitad de la probeta FGX que se rompe a compresión se le denomina FGXa. Los resultados se incluyen en la tabla A2.22 del anejo 2, exponiendo a continuación un resumen de los mismos (las probetas se ordenan por edad de rotura).

Tabla 133. Resistencia a compresión de las medias probetas rotas previamente a fatiga

Probeta n°	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad media (g/cm <sup>3</sup> )	Días de curado	Edad media (días)	Tensión de rotura COMPRESIÓN (MPa)	Tensión Media (MPa)
FG6.2a	2,095	2,035	79	90	--	2,604
FG6.4a	2,011		83		2,814	
FG1.1.a	2,131		90		--	
FG1.2.a	2,111		90		--	
FG6.6a	2,058		92		2,394	
FG5.2a	2,080	2,144	104	109	2,862	3,270
FG11.2a	2,123		106		3,667	
FG6.7a	2,181		107		2,096	
FG11.3a	2,197		113		1,715	
FG11.4a	2,193		113		4,456	
FG10.3a	2,083	2,101	127	144	3,394	3,805
FG6.9a	2,153		129		4,384	
FG10.2a	2,091		131		3,508	
FG10.5a	2,126		149		3,904	
FG1.3.a	2,064		165		3,659	
FG1.4.a	2,090		165		3,982	
FG6.11a		2,141		180	--	4,630
FG8.1a	2,155		180		4,947	
FG8.3a	2,073		180		4,748	
FG8.4a	2,174		180		5,773	
FG8.6a	2,144		180		4,127	
FG7.1a	2,066		181		3,518	
FG7.3a	2,175		181		4,798	
FG7.4a	2,201		181		4,498	
FG9.3a	2,083	2,102	186	187	4,752	4,083
FG9.5a	2,098		186		4,459	
FG9.6a	2,137		186		4,952	
FG9.8a	2,116		186		4,895	
FG8.5a	2,157		187		4,271	
FG6.13a	2,097		188		3,920	
FG6.14a	1,988		188		2,691	
FG6.15a	2,137		188		2,725	
FG6.16a	2,054		188		1,031	

Probeta nº	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad media (g/cm <sup>3</sup> )	Días de curado	Edad media (días)	Tensión de rotura COMPRESIÓN (MPa)	Tensión Media (MPa)
FG9.2a	2,064	2,091	204	204	3,454	4,340
FG9.7a	2,083		204		4,313	
FG9.9a	2,090		204		4,771	
FG9.10a	2,126		204		4,822	
FG2.1.a	2,099	2,072	301	302	4,342	4,487
FG2.2.a	2,108		301		4,341	
FG2.3.a	2,058		301		4,342	
FG2.4.a	2,058		303		4,350	
FG2.5.a	2,064		303		4,835	
FG2.6.a	2,044		303		4,712	
FG1.5.a	2,088	2,080	322	322	3,892	4,054
FG1.6.a	2,072		322		4,215	
FG3.1.a	2,084	2,069	394	394	6,160	5,172
FG3.2.a	2,084		394		5,836	
FG3.3.a	2,040		394		4,315	
FG3.4.a	2,058		394		5,295	
FG3.5.a	2,080		400		4,255	
FG4.3.a	2,061	2,065	492	492	4,102	4,128
FG4.5.a	2,079		492		4,185	
FG4.6.a	2,055		492		4,098	
FG3.6.a	2,086	2,086	548	548	4,434	4,434

En esta tabla, en la que se tienen resultados de roturas a compresión a edades muy diferentes entre 79 y 548 días, no se intenta establecer la correlación entre densidades y resistencias como se ha realizado en apartados diferentes, puesto que intervienen demasiados factores. La densidad que aparece en el cuadro es la que se obtuvo al pesar la probeta completa y puede no corresponderse con la mitad que se ensaya a compresión. Además esta mitad tiene longitud variable entre 30-36 cm y el ensayo de rotura a compresión se realiza únicamente sobre una superficie de 15 x 15 cm.

Respecto a la evolución de la resistencia a compresión en el tiempo, se incluye a continuación la gráfica obtenida con el conjunto de las probetas ensayadas a largo plazo:

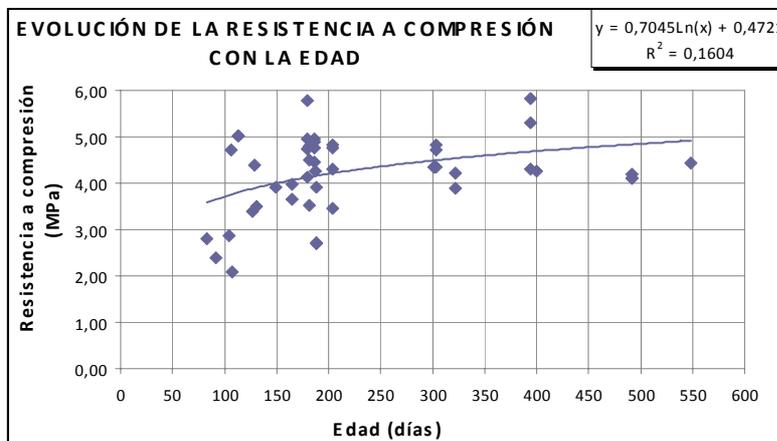


Figura 102. Evolución de la resistencia a compresión de los medios prismas obtenidos del ensayo de fatiga

La línea de tendencia es logarítmica, pues una recta (polinómica de primer grado) no tiene ninguna precisión. No obstante a cortas edades no se dispone de datos y hasta los 150 días esta línea tampoco es representativa. Para conocer la variación se analizan los valores medios que se han obtenido según las edades:

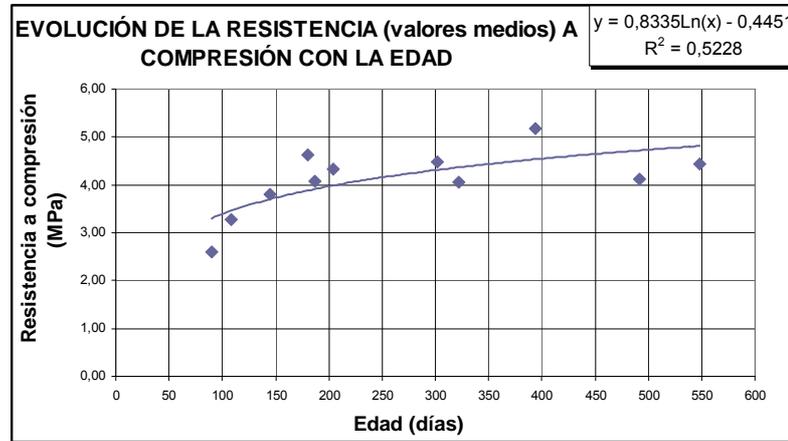


Figura 103. Evolución de la resistencia a compresión (valores medios) de los medios prismas obtenidos del ensayo de fatiga

En este caso la tendencia es parecida. Según los datos obtenidos, para crecimientos entre 100 y 500 días la relación establecida sería:

$$R_{c,LP} = 0,7045 \text{ Ln}(edad) + 0,4721$$

resultando con mayor precisión la relación obtenida con los valores medios de cada edad ( $R^2 = 0,5228$ ):

$$R_{c,LP} = 0,8335 \text{ Ln}(edad) - 0,4451$$

Si se eliminan los primeros valores obtenidos a 100 días, se puede obtener una línea de tendencia establecida por una recta que viene dada por:

$$R_{c,LP} = 0,0015 \cdot Edad + 3,9708$$

Es decir, se comprueba que a partir de cierta edad la línea de crecimiento de la resistencia a compresión con el tiempo tiende a la horizontal, creciendo mínimamente.

En cualquier caso, la relación establecida carece de precisión matemática al intentar englobar un elevado conjunto de factores como puede ser la diferente composición del material reciclado en cada probeta (a pesar de haber intentado cierta homogeneización en el laboratorio), las diferentes densidades obtenidas en las mismas o la procedencia de estas medias probetas de la carga y rotura previa a fatiga de la probeta principal.

Aunque como se indica, los resultados de resistencia a compresión están obtenidos a diferentes edades y esta evoluciona de forma creciente con el tiempo, se incluye un análisis

estadístico del conjunto de todos los valores obtenidos (aunque los rangos resultan lógicamente elevados):

Tablas 134 y 135. Análisis estadístico de resistencia a compresión de mitades rotas a fatiga

EVOLUCIÓN COMPRESIÓN PARÁMETROS ESTADÍSTICOS		EVOLUCIÓN COMPRESIÓN (valores medios) PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	49	Número	11
Media	4,2427	Media	4,0916
Varianza	0,7219	Varianza	0,4765
Desviación estándar	0,8497	Desviación estándar	0,6903
Mínimo	2,096	Mínimo	2,604
Máximo	6,160	Máximo	5,172
Rango	4,064	Rango	2,568
Coficiente de Asimetría	-0,4327	Coficiente de Asimetría	-0,8679
Coficiente de Curtosis	0,5262	Coficiente de Curtosis	1,3636

### 6.5.3. Ensayos de rotura a tracción indirecta de las medias probetas a fatiga

El medio prisma obtenido de la rotura a fatiga de la probeta FGX, que se ensaya a tracción indirecta se le denomina FGXb. Los resultados obtenidos se incluyen con todos los detalles en la tabla A2.23 del anejo 2, exponiéndose a continuación un resumen de los mismos:

Tabla 136. Resistencia a tracción indirecta de las medias probetas rotas previamente a fatiga

Probeta nº	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )		Días de curado	Edad media (días)	Tensión de rotura TRACCIÓN INDIRECTA (MPa)	Tensión Media (MPa)			
FG6.2b	2,095	2,081	79	90	0,317	0,315			
FG6.4b	2,011		83		0,294				
FG1.1.b	2,131		90						
FG1.2.b	2,111		90						
FG6.6b	2,058		92		0,333				
FG5.2b	2,080	2,148	104	109	0,246	0,329			
FG11.2b	2,123		106		0,336				
FG6.7b	2,181		107		0,033				
FG11.3b	2,197		113		0,448				
FG11.4b	2,193		113		0,285				
FG6.9b	2,153	2,113	129	137	0,407	0,374			
FG10.2b	2,091		131		0,437				
FG10.3b	2,083		139		0,302				
FG10.5b	2,126		149		0,348				
FG1.3.b	2,064		2,077		165		165	0,434	0,445
FG1.4.b	2,090	165		0,456					
FG6.11b	--	2,140	181	186	0,405	0,358			
FG9.3b	2,083		186		0,335				
FG9.5b	2,098		186		0,053				
FG9.6b	2,137		186		0,130				
FG9.8b	2,116		186		0,253				
FG8.5b	2,157		187		0,370				
FG8.3b	2,073		187		0,498				
FG8.4b	2,174		187		0,451				
FG7.3b	2,175		188		0,251				
FG7.4b	2,201		188		0,299				
FG8.6b	2,144		2,122		196		196	0,384	0,390
FG8.1b	2,155				196			0,349	
FG7.1b	2,066	197		0,437					

Probeta nº	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )		Días de curado	Edad media (días)	Tensión de rotura TRACCIÓN INDIRECTA (MPa)	Tensión Media (MPa)
FG6.13b	2,097	2,074	204	204	0,391	0,406
FG6.14b	1,988		204		0,289	
FG6.15b	2,137		204		0,222	
FG6.16b	2,054		204		0,215	
FG9.2b	2,064		204		0,412	
FG9.7b	2,083		204		0,468	
FG9.9b	2,090		204		0,416	
FG9.10b	2,126		204		0,459	
FG2.1.b	2,099	2,072	301	302	0,541	0,498
FG2.2.b	2,108		301		0,473	
FG2.3.b	2,058		301		0,375	
FG2.4.b	2,058		303		0,465	
FG2.5.b	2,064		303		0,408	
FG2.6.b	2,044		303		0,728	
FG1.5.b	2,088	2,080	322	322	0,317	0,341
FG1.6.b	2,072		322		0,365	
FG3.1.b	2,084	2,069	394	394	0,490	0,424
FG3.2.b	2,084		394		0,419	
FG3.3.b	2,040		394		0,403	
FG3.4.b	2,058		394		0,321	
FG3.5.b	2,080		400		0,485	
FG4.3.b	2,061	2,070	492	492	0,317	0,381
FG4.5.b	2,079		492		0,445	
FG4.6.b	2,055		492		0,231	
FG3.6.b	2,086	2,086	548	548	0,251	

Como las probetas proceden de los ensayos de fatiga, solo se dispone de valores de roturas a largo plazo, entre 79 y 548 días. No se establece ninguna correlación entre densidades y resistencias a tracción indirecta por los mismos motivos que se han indicado en el caso de resistencia a compresión, al intervenir los mismos factores. La densidad que aparece en el cuadro corresponde a la calculada para la probeta entera y puede no coincidir con la de la mitad ensayada.

Respecto a la evolución de la resistencia a tracción indirecta en el tiempo se incluye a continuación la gráfica obtenida con el conjunto de las probetas ensayadas a largo plazo:

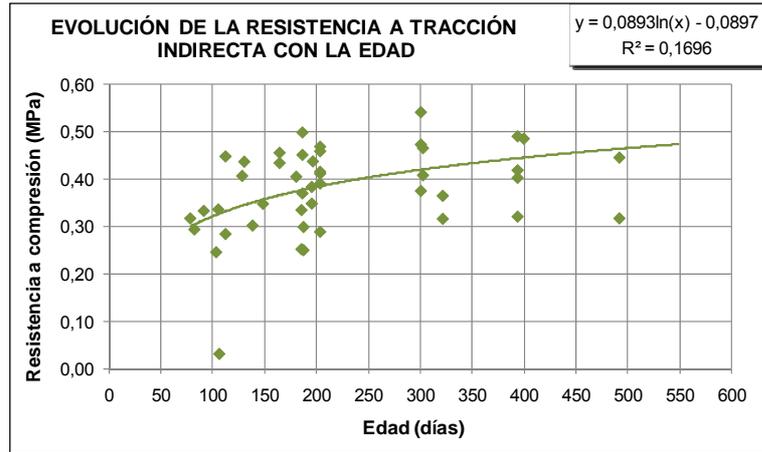


Figura 104. Evolución de la resistencia a tracción indirecta de los medios prismas obtenidos del ensayo de fatiga

La línea de tendencia es logarítmica, pues una recta (polinómica de primer grado) no tiene ninguna precisión. No obstante, a cortas edades no se dispone de datos y hasta los 80 días esta línea tampoco es representativa. Para conocer la variación se analizan los valores medios que se han obtenido según las edades:

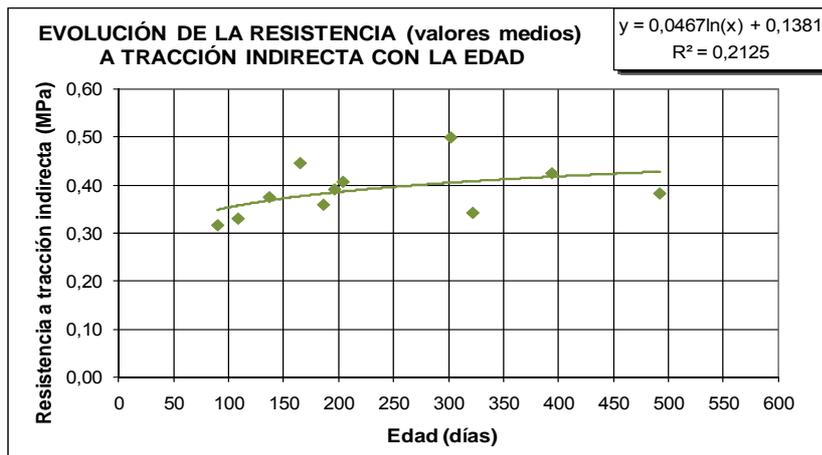


Figura 105. Evolución de la resistencia a tracción indirecta (valores medios) de los medios prismas obtenidos del ensayo de fatiga

En este caso la tendencia también es parecida. La relación establecida para crecimientos entre 150 y 500 días, vendría dada por la relación (de escasa precisión):

$$R_{i,LP} = 0,0893 \ln(\text{edad}) - 0,0897$$

En el caso de considerar una recta como línea de tendencia se obtendría:

$$R_{i,LP} = 0,0003 \cdot \text{Edad} + 0,3096$$

que aunque carece de precisión, indica claramente la tendencia de la resistencia a mantenerse constante en un valor y no crecer a penas más a partir de ciertas edades.

La valoración estadística de los resultados obtenidos a tracción indirecta se observa en las siguientes tablas, aunque conviene resaltar que los valores están obtenidos a edades muy

variables comprendidos entre los 79 y los 548 días, por lo que dado carácter creciente de la resistencia, se obtienen rangos elevados:

Tablas 137 y 138. Análisis estadístico de resistencias a tracción indirecta de mitades rotas a fatiga

EVOLUCIÓN COMPRESIÓN PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	45
Media	0,3913
Varianza	0,0080
Desviación estándar	0,0895
Mínimo	0,246
Máximo	0,728
Rango	0,482
Coefficiente de Asimetría	1,0599
Coefficiente de Curtosis	3,1558

EVOLUCIÓN COMPRESIÓN (valores medios) PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	11
Media	0,3860
Varianza	0,0030
Desviación estándar	0,0546
Mínimo	0,315
Máximo	0,498
Rango	0,183
Coefficiente de Asimetría	0,7591
Coefficiente de Curtosis	0,2835

#### 6.5.4. Relación resistencia a compresión – resistencia a tracción indirecta

Los resultados obtenidos de resistencia a compresión y a tracción indirecta en cada una de las dos mitades de cada prisma ensayadas previamente a fatiga son:

Tabla 139. Resultados de resistencia a compresión y a tracción indirecta en los medios prismas obtenidos del ensayo a fatiga

	Tensión de rotura Compresión (MPa)	Tensión de rotura Tracción indirecta (MPa)	Rti/Rc
FG6.4	2,814	0,294	0,105
FG6.6	2,394	0,333	0,139
FG5.2	2,862	0,246	0,086
FG11.2	3,667	0,336	0,092
FG6.7	2,096	0,033	0,016
FG11.3	1,715	0,448	0,261
FG11.4	4,456	0,285	0,064
FG10.3	3,394	0,407	0,120
FG6.9	4,384	0,380	0,087
FG10.2	3,508	0,302	0,086
FG10.5	3,904	0,348	0,089
FG1.3	3,659	0,434	0,119
FG1.4	3,982	0,456	0,114
FG8.1	4,947	0,349	0,070
FG8.3	4,748	0,498	0,105
FG8.4	5,773	0,451	0,078
FG8.6	4,127	0,384	0,093
FG7.1	3,518	0,437	0,124
FG7.3	4,798	0,251	0,052
FG7.4	4,498	0,299	0,067
FG9.3	4,752	0,335	0,070
FG9.5	4,459	0,053	0,012
FG9.6	4,952	0,130	0,026
FG9.8	4,895	0,253	0,052
FG8.5	4,271	0,370	0,087
FG6.13	3,920	0,391	0,100
FG6.14	2,691	0,289	0,107
FG6.15	2,725	0,222	0,082
FG6.16	1,031	0,215	0,209
FG9.2	3,454	0,412	0,119
FG9.7	4,313	0,468	0,109
FG9.9	4,771	0,416	0,087

	Tensión de rotura Compresión (MPa)	Tensión de rotura Tracción indirecta (MPa)	Rti/Rc
FG9.10	4,822	0,459	0,095
FG2.1.	4,342	0,541	0,125
FG2.2.	4,341	0,473	0,109
FG2.3.	4,342	0,375	0,086
FG2.4.	4,350	0,465	0,107
FG2.5.	4,835	0,408	0,084
FG2.6.	4,712	0,728	0,155
FG1.5.	3,892	0,317	0,081
FG1.6.	4,215	0,365	0,087
FG3.1.	6,160	0,490	0,080
FG3.2.	5,836	0,419	0,072
FG3.3.	4,315	0,403	0,093
FG3.4.	5,295	0,321	0,061
FG3.5.	4,255	0,485	0,114
FG4.3.	4,102	0,317	0,077
FG4.5.	4,185	0,445	0,106
FG4.6.	4,098	0,231	0,056
FG3.6.	4,434	0,251	0,057

y la relación entre ambas variables es difícil de definir, obteniéndose una recta de escasa precisión:

$$R_{ti,LP} = 0,0334 R_{C,LP} + 0,2239$$

Cuyas características pueden apreciarse en la gráfica y el estudio estadístico posterior:

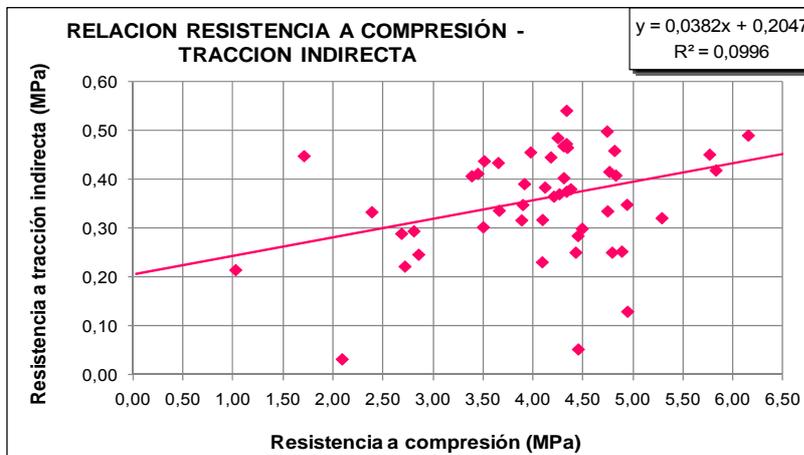


Figura 106. Relación resistencia compresión – tracción indirecta a largo plazo en medias probetas rotas a fatiga

Tabla 140. Análisis estadístico del cociente resistencia a tracción indirecta / compresión en medias probetas rotas a fatiga

EVOLUCIÓN COMPRESIÓN (valores medios)	
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	
Número	50
Media	0,0934
Varianza	0,0017
Desviación estándar	0,0410
Mínimo	0,012
Máximo	0,261
Rango	0,249
Coefficiente de Asimetría	1,5501
Coefficiente de Curtosis	5,8266

La relación establecida entre ambas variables viene definida por una recta de pendiente muy inferior a la definida en los apartados anteriores 6.2.3 y 6.3.4.3 (pendiente = 0,1), fruto de la dispersión de resultados ya comentada.

## 6.6. LEYES DE FATIGA DEL MATERIAL RECICLADO

### 6.6.1. Ley de fatiga de las probetas prismáticas ensayadas directamente a fatiga

Las características de las sollicitaciones habituales que soporta un firme durante su vida en servicio hace que su agotamiento estructural se produzca por fatiga de un modo progresivo e inevitable. Las cargas a las que se ven sometidas las capas son de corta duración y producen tensiones y deformaciones muy reducidas, pero su acumulación provoca una progresiva pérdida de rigidez del material que conduce a la fisuración y fatiga del firme.

La vida del firme puede determinarse teóricamente y es el objeto de los modelos de comportamiento que utilizan las leyes de fatiga con el objeto de evaluar la respuesta reológica de los materiales.

Las leyes de fatiga de los materiales tratados con cemento, entre los que se incluye el reciclado con cemento del firme, tiene como expresión general la siguiente expresión:

$$\frac{\sigma}{R_f} = 1 + a \cdot \log N$$

en donde “σ” es la tensión de flexotracción que provoca la rotura después de un número “N” de aplicaciones de la carga tipo y “a” es un coeficiente que depende de la naturaleza y características del material.

El comportamiento a fatiga de este material se obtiene mediante ajuste estadístico de los valores obtenidos en los ensayos. No hay que olvidar que existe cierta dispersión en los

valores obtenidos originada por la heterogeneidad de las características del material y las condiciones de los ensayos.

Con el número de ciclos de carga soportado por cada una de las probetas en el ensayo de carga sinusoidal hasta la rotura por fatiga, se calcula la ley de fatiga del material reciclado. Para ello, se obtiene la línea de tendencia del conjunto de puntos obtenidos en la gráfica logarítmica formada por las coordenadas “número de aplicaciones de carga soportado hasta la rotura – porcentaje de carga aplicada respecto a la carga de rotura a flexotracción”. Este valor del eje de ordenadas ( $\sigma/R_f$ ) depende del grupo en el que se haya ensayado la probeta. Los resultados obtenidos en cada caso son:

Tabla 141. Resultados del ensayo de fatiga

Probeta nº	Fecha inicio ensayo	Grupo de Carga	Proporción carga máx. aplicada ( $\sigma/R_f$ )	Tensión de rotura $R_f$ MPa	Nº de ciclos
AP7.1	06/06/2008	G1 (50-25%)	50%	0,690	3.250.000
AP7.2	13/06/2008	G2 (65-30%)	65%	0,690	1.340.000
FG1.1	17/06/2008	G3 (80-40%)	80%	0,690	74
FG1.2	18/06/2008	G3 (80-40%)	80%	0,690	0 (en carga)
FG1.3	19/06/2008	G3 (80-40%)	80%	0,690	104.534
FG1.4	20/06/2008	G3 (80-40%)	80%	0,690	13.473
FG1.5	06/08/2008	G1 (50-25%)	50%	0,690	511.365
FG1.6	07/08/2008	G2 (65-30%)	65%	0,690	7.042
FG2.1	20/06/2008	G2 (65-30%)	65%	0,690	5.080.000
FG2.2	08/08/2008	G2 (65-30%)	65%	0,690	1.097.880
FG2.3	11/08/2008	G1 (50-25%)	50%	0,690	18.648.940
FG2.4	24/11/2008	G1 (50-25%)	50%	0,690	298.501
FG2.5	22/07/2008	G3 (80-40%)	80%	0,690	2.515.244
FG2.6	05/08/2008	G3 (80-40%)	80%	0,690	3.217
FG3.1	26/11/2008	G1 (50-25%)	50%	0,690	5.285.353
FG3.2	05/12/2008	G1 (50-25%)	50%	0,690	11.487.356
FG3.3	19/01/2009	G2 (65-30%)	65%	0,690	23.157
FG3.4	23/01/2009	G2 (65-30%)	65%	0,690	11.476.510
FG3.5	17/01/2009	G3 (80-40%)	80%	0,690	21.799.325
FG3.6	18/06/2009	G3 (80-40%)	80%	0,690	1.357
FG4.3	30/06/2009	G3 (80-40%)	80%	0,690	0 (en carga)
FG4.5	03/07/2009	G3 (80-40%)	80%	0,690	10.108
FG4.6	03/07/2009	G2 (65-30%)	65%	0,690	2.011
FG5.2	20/10/2009	G3 (80-40%)	80%	0,366	868
FG6.2	30/09/2009	G3 (80-40%)	80%	0,538	12.884
FG6.4	02/10/2009	G2 (65-30%)	65%	0,667	34.589
FG6.6	06/10/2009	G3 (80-40%)	80%	0,500	1.561
FG6.7	22/10/2009	G3 (80-40%)	80%	0,221	2.913
FG6.9	17/11/2009	G2 (65-30%)	65%	0,638	426.140
FG6.11	23/11/2009	G2 (65-30%)	65%	0,69	13.096.690
FG6.13	08/01/2010	G3 (80-40%)	80%	0,690	59.306
FG6.14	08/01/2010	G3 (80-40%)	80%	0,600	2.103.978
FG6.15	11/01/2010	G3 (80-40%)	80%	0,690	42
FG6.16	12/01/2010	G3 (80-40%)	80%	0,600	74
FG7.1	12/01/2010	G3 (80-40%)	80%	0,690	48
FG7.3	13/01/2010	G3 (80-40%)	80%	0,690	123
FG7.4	13/01/2010	G3 (80-40%)	80%	0,600	1.245
FG8.1	15/01/2010	G3 (80-40%)	80%	0,690	15.179
FG8.3	15/01/2010	G3 (80-40%)	80%	0,690	1.126
FG8.4	18/01/2010	G3 (80-40%)	80%	0,600	254.205
FG8.5	18/01/2010	G3 (80-40%)	80%	0,690	1.052
FG8.6	18/01/2010	G3 (80-40%)	80%	0,600	2.849
FG9.2	08/02/2010	G2 (65-30%)	65%	0,600	21.555
FG9.3	21/01/2010	G3 (80-40%)	80%	0,690	129

Probeta n°	Fecha inicio ensayo	Grupo de Carga	Proporción carga máx. aplicada ( $\sigma/R_f$ )	Tensión de rotura $R_f$ MPa	N° de ciclos
FG9.5	21/01/2010	G3 (80-40%)	80%	0,690	64
FG9.6	22/01/2010	G3 (80-40%)	80%	0,600	7.567
FG9.7	03/02/2010	G2 (65-30%)	65%	0,690	70.348
FG9.8	22/01/2010	G3 (80-40%)	80%	0,600	1.579
FG9.9	02/02/2010	G2 (65-30%)	65%	0,690	292.855
FG9.10	04/02/2010	G2 (65-30%)	65%	0,600	1.818.254
FG10.2	14/04/2010	G2 (65-30%)	65%	0,561	2.404.230
FG10.3	22/04/2010	G2 (65-30%)	65%	0,539	6.400.000
FG10.5	04/05/2010	G2 (65-30%)	65%	0,669	2.432.106
FG11.2	20/05/2010	G2 (65-30%)	65%	0,600	217.296
FG11.3	02/06/2010	G3 (80-40%)	80%	0,600	41.102
FG11.4	04/06/2010	G2 (65-30%)	65%	0,600	70.943

Representando dichos puntos en una gráfica con el eje de abcisas en escala logarítmica se obtiene:

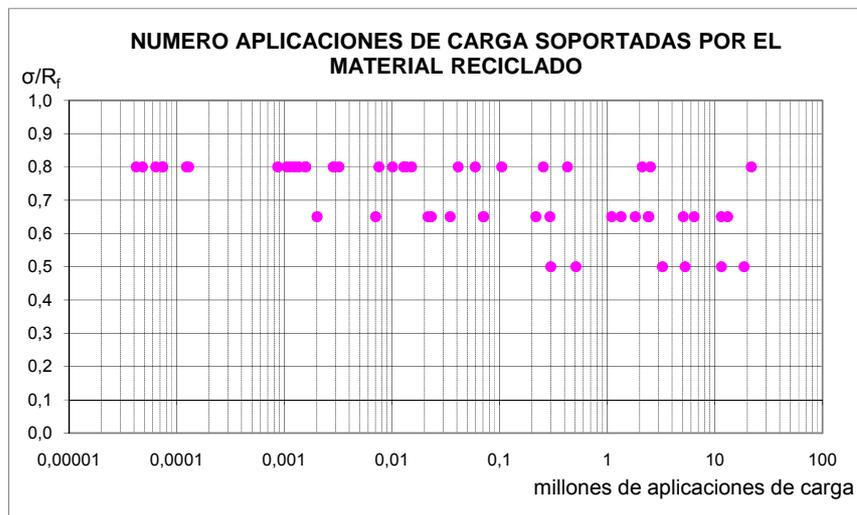


Figura 107. Número de aplicaciones de carga soportadas por las probetas de material reciclado

Existe relación estadísticamente significativa entre  $\sigma/R_f$  y el número de ciclos (expresado en millones de aplicaciones de carga) para un nivel de confianza del 99%. La recta de regresión que más se ajusta a los puntos nos da la ley de fatiga. Lógicamente esta debería pasar por el punto  $(1 \cdot 10^{-6}, 1)$ , es decir para una tensión igual al 100% de la de rotura ( $\sigma/R_f = 1$ ), la probeta solo resistirá una aplicación ( $1 \cdot 10^{-6}$  millones de aplicaciones de carga).

Por ello la ley de fatiga, igual que la utilizada para el suelocemento o la gravacemento, debe ser de la forma:

$$\frac{\sigma}{R_f} = 1 - a \cdot \log N$$

Para obtener la pendiente “a” se debe determinar la recta para la que sea mínima la suma de la distancia de cada punto de la nube de resultados obtenidos a dicha recta, o lo que resulta más sencillo de calcular, habrá que determinar la pendiente para que sea mínima la suma de los cuadrados de la distancia de cada punto a la recta.

Llamando “y” a la relación tensión aplicada/tensión de rotura ( $\sigma/R_f$ ) y calculando el logaritmo del número de ciclos o aplicaciones de carga obtenida en cada punto, que denominaremos “x” ( $x = \log N$ ), la recta “r” será de la forma:

$$y = 1 - a \cdot x$$

$$a \cdot x + y - 1 = 0$$

y la distancia de cualquier punto ( $P_1, P_2$ ) a la recta vendrá dada por:

$$d(P, r) = \frac{|a \cdot P_1 + P_2 - 1|}{\sqrt{a^2 + 1}}$$

siendo el cuadrado de la distancia del punto P a la recta r:  $a^2$

$$d^2(P, r) = \frac{(a \cdot P_1 + P_2 - 1)^2}{(a^2 + 1)}$$

y la suma de los cuadrados de la distancia de cada punto:

$$\sum d^2(P, r) = \sum \frac{(a \cdot P_1 + P_2 - 1)^2}{(a^2 + 1)}$$

La distancia mínima se obtendrá igualando a cero la primera derivada de la ecuación (o lo que es lo mismo igualando a cero el numerador de la derivada):

$$\sum [2 \cdot (a \cdot P_1 + P_2 - 1) \cdot P_1 \cdot (a^2 + 1) - 2 \cdot a \cdot (a \cdot P_1 + P_2 - 1)^2] = 0$$

Desarrollando la expresión se tiene:

$$\sum [a^3 \cdot 2P_1^2 + a^2 \cdot 2P_1(P_2 - 1) + a \cdot 2P_1^2 + 2P_1(P_2 - 1) - a^3 \cdot 2P_1^2 - a^2 \cdot 4P_1(P_2 - 1) - a \cdot 2(P_2 - 1)^2] = 0$$

$$\sum [a^2 \cdot (-P_1 \cdot (P_2 - 1)) + a \cdot (P_1^2 - (P_2 - 1)^2) + P_1 \cdot (P_2 - 1)] = 0 \quad [1]$$

Sustituyendo  $P_1$  y  $P_2$  por todos los valores obtenidos en los ensayos y representados en la figura 108 con coordenadas ( $\sigma/R_f, \log N$ ) con la ayuda de una hoja de cálculo, cuyos datos se incluyen en la tabla A2.24 del anejo 2, se llega a una solución del tipo:

$$77,3229 a^2 + 1.299,0899 a - 77,3229 = 0$$

resultando la pendiente

$$a = 0,05931144$$

es decir, la ley de fatiga calculada para el material reciclado es:

$$\frac{\sigma}{R_f} = 1 - 0,05931144 \cdot \log N$$

o de una manera simplificada

$$\frac{\sigma}{R_f} = 1 - 0,059 \cdot \log N$$

en donde:

$\sigma$  = tensión de flexotracción que provoca la rotura después de un número N de aplicaciones de carga tipo

$R_f$  = resistencia a flexotracción del material

N = número de aplicaciones de la carga provocando la tensión  $\sigma$  que puede soportar el material hasta la rotura.

Representada gráficamente, la ley de fatiga del material reciclado es de la siguiente manera:

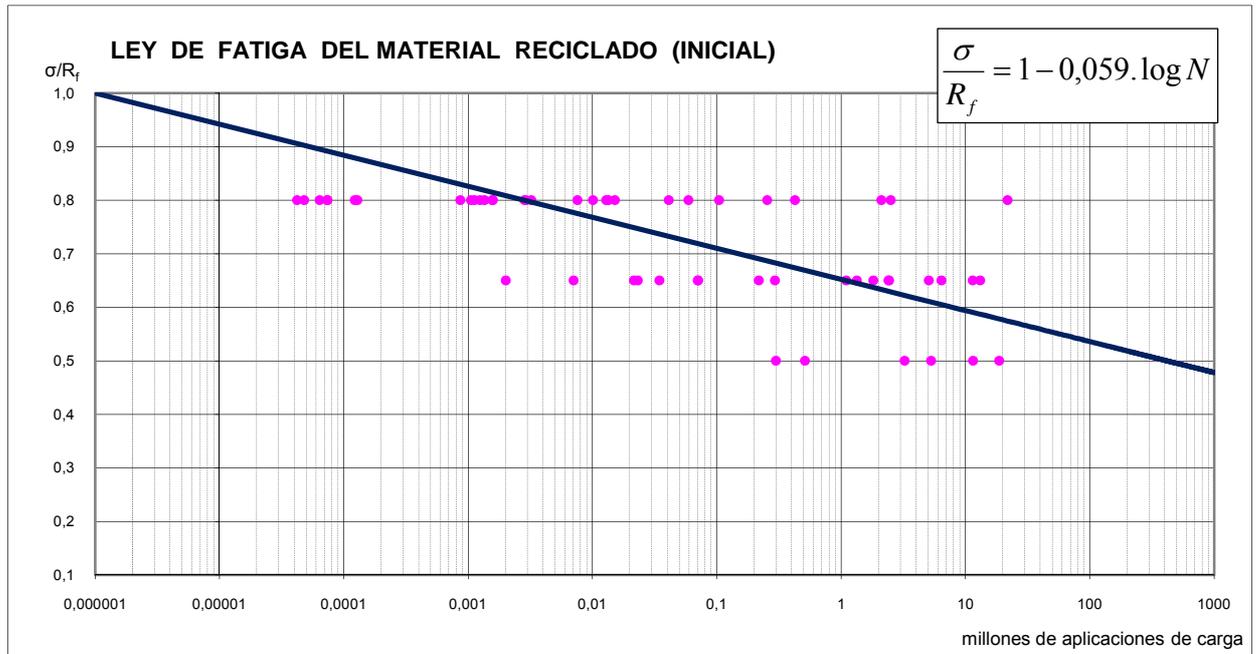


Figura 108. Ley de fatiga obtenida en el laboratorio para el material reciclado (inicial)

Ahora bien, conviene introducir ciertos criterios de corrección del porcentaje de la carga máxima aplicada en algunos valores estimados pues, como se explica en el punto 6.5.1, en algunos casos se realizaron las pruebas a fatiga con valores de la carga de rotura  $R_f$  estimados y no reales obteniéndose valores más aproximados a posteriori. Los valores a modificar corresponden a las siguientes probetas:

Tabla 142. Correcciones en las cargas de rotura consideradas en los ensayos de fatiga

Probeta	Carga máx. Introducida en prensa	$R_f$ probeta gemela (MPa)	Carga máx. a considerar ( $\sigma/R_f$ )
FG4.5	80% de 0,69	0,599	92%
FG4.6	65% de 0,69	0,599	75%
FG6.6	80% de 0,50	0,556	72%
FG7.1	80% de 0,69	0,420	98%
FG9.2	65% de 0,60	0,673	58%
FG9.5	80% de 0,69	0,609	91%
FG11.2	65% de 0,60	0,501	78%

Así, con estas correcciones introducidas, la nube de puntos obtenida se modifica de acuerdo con la siguiente figura:

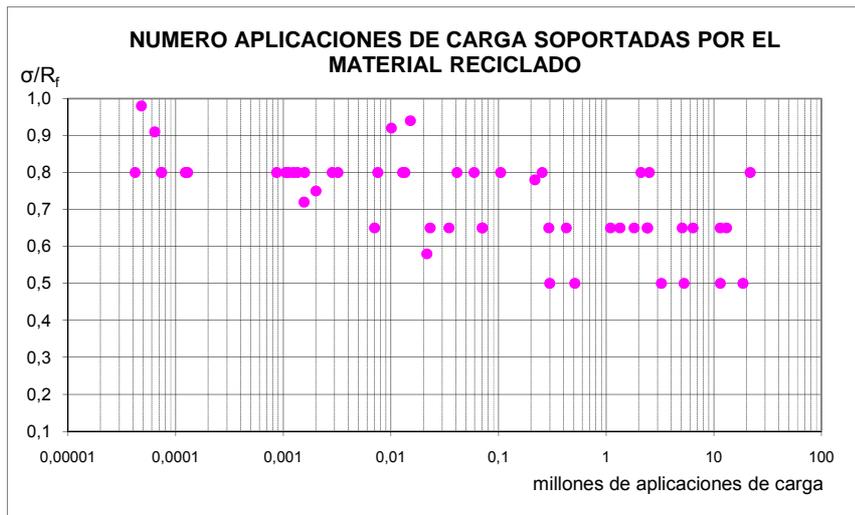


Figura 109. Numero de aplicaciones de carga soportadas por el material reciclado (valores corregidos)

y sustituyendo los valores ( $P_1$ ,  $P_2$ ) en la formula [1] anteriormente indicada para obtener la nueva pendiente, de acuerdo con los cálculos incluidos en la tabla A2.25 del anejo 2, se obtiene una ecuación del tipo:

$$74,5975 a^2 + 1.287,3115 a - 74,5975 = 0$$

resultando una pendiente

$$a = 0,05775497$$

es decir la ley de fatiga calculada para el material reciclado resulta:

$$\frac{\sigma}{R_f} = 1 - 0,05775497 \cdot \log N$$

o de manera simplificada:

$$\frac{\sigma}{R_f} = 1 - 0,058 \cdot \log N$$

siendo la representación gráfica de la ley de fatiga del material reciclado la siguiente:

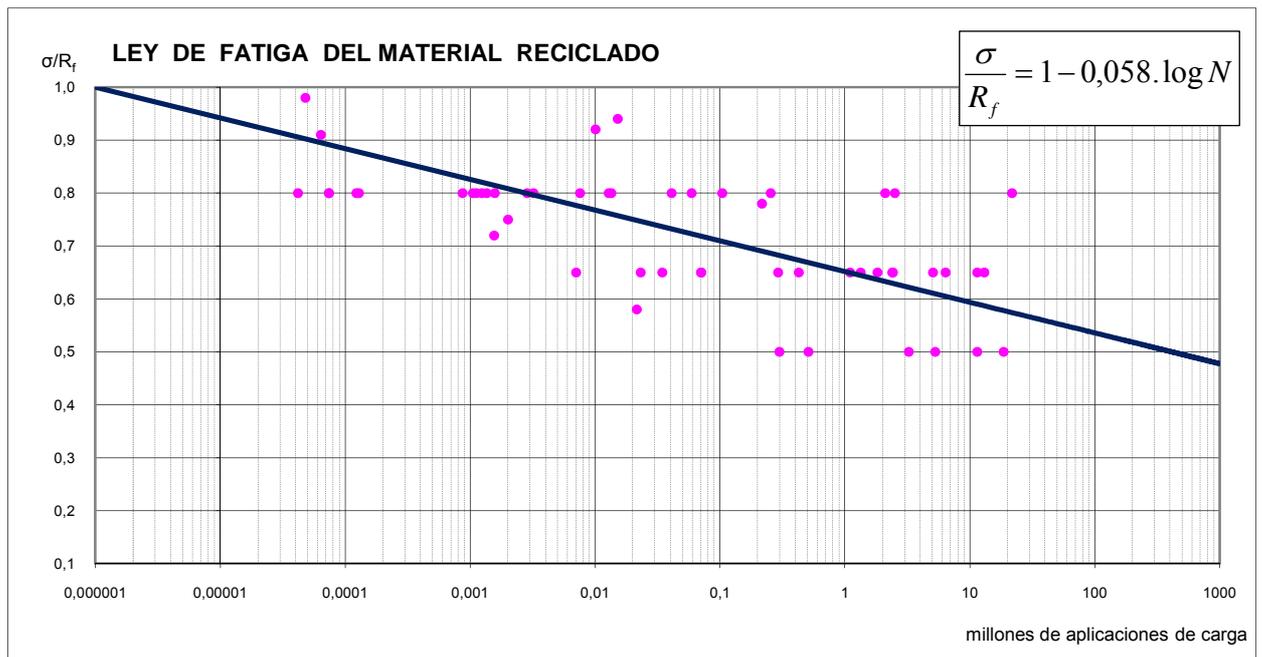


Figura 110. Ley de fatiga obtenida en el laboratorio para el material reciclado (corregida)

En Francia, país pionero en el desarrollo de toda la tecnología de estudio y empleo de materiales tratados con cemento, el comportamiento de estos materiales se determina por su resistencia a tracción a largo plazo.

Según la Guía de dimensionamiento francesa<sup>(76)</sup> se clasifican 5 tipos de gravacemento denominados G1 a G5, quedando la gravacemento utilizada en España próxima a una G2 alta, y 6 categorías de suelocemento, estando el suelocemento español de 2,5 MPa de resistencia a compresión, próximo a un S2 bajo. El material reciclado estudiado se encontraría en la frontera entre un S1 y un S2. No obstante, la realidad constructiva descrita en el Catálogo de secciones francés<sup>(77)</sup> es que prácticamente sólo se emplean los tipos G2 y G3 para gravas tratadas y S2 y S3 para suelocemento.

En la expresión general de la ley de fatiga de estos materiales, el valor de “a” en Francia viene determinado para 10<sup>6</sup> ciclos en función de la resistencia a flexotracción R<sub>f</sub>. Así,

la expresión de la ley de fatiga, considerando el intervalo  $10^5$  a  $10^7$  ciclos, se asemeja para simplificar los cálculos a la siguiente:

$$\sigma = R_f \cdot \left( \frac{N}{10^6} \right)^b$$

estando relacionados “b” y la pendiente “a” por la siguiente expresión:

$$b = -0,5 \cdot \log\left[\frac{1+5a}{1+7a}\right]$$

Para buscar semejanza con el sistema de cálculo francés, se presenta también en forma potencial la ley de fatiga obtenida en los ensayos y cálculos realizados anteriormente:

$$\sigma = R_f \cdot 0,64 \cdot \left( \frac{N}{10^6} \right)^{-0,035}$$

Esta expresión matemática de la ley, que se corresponde con la calculada tiene un coeficiente  $R^2$  de 0,9857, es decir el modelo explica un 98,57% de la variabilidad en  $\sigma/R_f$  después de la transformación a escala logarítmica para linealizar el modelo. El coeficiente de correlación en este caso es prácticamente 1, indicando una fuerte relación entre las variables. El error estándar de la estimación 0,0289 muestra la desviación típica de los residuos y el error absoluto medio 0,0220 es el valor medio de los residuos.

### **6.6.2. Ley de fatiga deducida de los semiprismas rotos a compresión**

La resistencia a flexotracción de cada probeta es un dato básico para calcular los límites de la carga sinusoidal a la que se someten las probetas en los ensayos de fatiga y para calcular analíticamente el comportamiento del material y del conjunto del firme. Considerando las dificultades comentadas en el apartado 6.5.1 para determinar dicha resistencia, como comprobación se va a estimar la resistencia a flexotracción de cada probeta a partir de los resultados obtenidos de resistencia a compresión y a tracción indirecta de los semiprismas que han resultado del ensayo a fatiga y las relaciones establecidas entre estas resistencias en los apartados 6.3.4.1 y 6.3.4.2.

Así, para calcular la resistencia a flexotracción estimada a partir de la resistencia a compresión obtenida en las semiprobetas ensayadas previamente a fatiga, se parte de la relación lineal establecida entre ambas variables en el apartado 6.3.4.1 obtenida para largo plazo en los ensayos realizados a flexotracción de las probetas prismáticas gemelas, y que viene definida por la expresión:

$$R_{f,LP} = 0,1104 R_{C,LP} + 0,1730 \quad [2]$$

Resultando la siguiente resistencia a flexotracción para cada probeta:

Tabla 143. Resistencia a flexotracción estimada a partir de la resistencia obtenida a compresión

Probeta nº	Días de curado	Edad media (días)	R. compresión (MPa)	R <sub>c</sub> media (MPa)	R. flexotrac. estimada a partir de la compresión	R. flexotrac. media estimada
FG6.2a	79	90	--	2,604		0,460
FG6.4a	83		2,814		0,484	
FG1.1.a	90					
FG1.2.a	90					
FG6.6a	92		2,394		0,437	
FG5.2a	104	109	2,862	3,270	0,489	0,534
FG11.2a	106		3,667		0,578	
FG6.7a	107		2,096		0,404	
FG11.3a	113		1,715		0,362	
FG11.4a	113		4,456		0,665	
FG10.3a	127	144	3,394	3,805	0,548	0,593
FG6.9a	129		4,384		0,657	
FG10.2a	131		3,508		0,560	
FG10.5a	149		3,904		0,604	
FG1.3.a	165		3,659		0,577	
FG1.4.a	165		3,982		0,613	
FG8.1a	180	180	4,947	4,630	0,719	0,684
FG8.3a	180		4,748		0,697	
FG8.4a	180		5,773		0,810	
FG8.6a	180		4,127		0,629	
FG7.1a	181		3,518		0,561	
FG7.3a	181		4,798		0,703	
FG7.4a	181		4,498		0,670	
FG9.3a	186	187	4,752	4,083	0,698	0,624
FG9.5a	186		4,459		0,665	
FG9.6a	186		4,952		0,720	
FG9.8a	186		4,895		0,713	
FG8.5a	187		4,271		0,644	
FG6.13a	188		3,920		0,606	
FG6.14a	188		2,691		0,470	
FG6.15a	188		2,725		0,474	
FG6.16a	188		1,031		0,287	
FG9.2a	204		204		3,454	
FG9.7a	204	4,313		0,649		
FG9.9a	204	4,771		0,700		
FG9.10a	204	4,822		0,705		
FG2.1.a	301	302	4,342	4,487	0,652	0,668
FG2.2.a	301		4,341		0,652	
FG2.3.a	301		4,342		0,652	
FG2.4.a	303		4,350		0,653	
FG2.5.a	303		4,835		0,707	
FG2.6.a	303		4,712		0,693	
FG1.5.a	322	322	3,892	4,054	0,603	0,621
FG1.6.a	322		4,215		0,638	
FG3.1.a	394	394	6,160	5,172	0,853	0,744
FG3.2.a	394		5,836		0,817	
FG3.3.a	394		4,315		0,649	
FG3.4.a	394		5,295		0,758	
FG3.5.a	400		4,255		0,643	
FG4.3.a	492	492	4,102	4,128	0,626	0,629
FG4.5.a	492		4,185		0,635	
FG4.6.a	492		4,098		0,625	
FG3.6.a	548	548	4,434	4,434	0,663	0,663
FG6.11a						

Expresado de forma gráfica, la resistencia a flexotracción estimada a partir de la obtenida en los semiprismas rotos a compresión crece con la edad de las probetas de acuerdo a la siguiente nube de puntos:

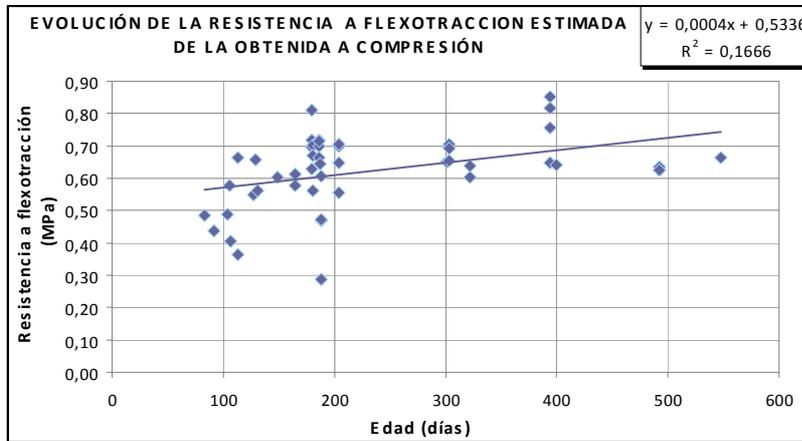


Figura 111. Evolución de la resistencia a flexotracción estimada de la resistencia obtenida a compresión

Ahora bien, esta resistencia a flexotracción estimada a partir de los semiprismas rotos a compresión, modifica la relación  $\sigma/R_f$  que se había considerado, cambiando incluso la clasificación realizada de las probetas en los 3 grupos de rotura a fatiga definidos en el apartado 6.5.1 (carga máxima 80%, 65% y 50%).

En la tabla siguiente se calcula para cada probeta, con que porcentaje de la resistencia a flexotracción obtenida se ha cargado realmente durante el ensayo de rotura a fatiga y en que grupo de rotura se encuentra en función de las nuevas resistencias a flexotracción estimadas (se crea un nuevo grupo G4 para cargas máximas superiores al 80% de  $R_f$ ).

Tabla 144. Porcentaje de la resistencia a flexotracción estimada a partir de los semiprismas rotos a compresión y la relación línea [2]

	Días de curado	Tensión de rotura (MPa)	R. flexotrac. estimada a partir de la compresión	% de $R_f$ estimada con la que se ha cargado la probeta	Grupo de carga al que corresponde
FG1.1.a	90				
FG1.2.a	90				
FG1.3.a	165	3,659	0,577	96%	G4
FG1.4.a	165	3,982	0,613	90%	G4
FG1.5.a	322	3,892	0,603	57%	G2
FG1.6.a	322	4,215	0,638	71%	G3
FG2.1.a	301	4,342	0,652	69%	G3
FG2.2.a	301	4,341	0,652	69%	G3
FG2.3.a	301	4,342	0,652	53%	G2
FG2.4.a	303	4,350	0,653	53%	G2
FG2.5.a	303	4,835	0,707	78%	G3
FG2.6.a	303	4,712	0,693	80%	G3
FG3.1.a	394	6,160	0,853	41%	G1
FG3.2.a	394	5,836	0,817	42%	G1
FG3.3.a	394	4,315	0,649	69%	G3
FG3.4.a	394	5,295	0,758	59%	G2
FG3.5.a	400	4,255	0,643	86%	G4
FG3.6.a	548	4,434	0,663	83%	G4
FG4.3.a	492	4,102	0,626	88%	G4

	Días de curado	Tensión de rotura (MPa)	R. flexotracc. estimada a partir de la compresión	% de R <sub>f</sub> estimada con la que se ha cargado la probeta	Grupo de carga al que corresponde
FG4.5.a	492	4,185	0,635	87%	G4
FG4.6.a	492	4,098	0,625	72%	G3
FG5.2a	104	2,862	0,489	60%	G2
FG6.2a	79	--			
FG6.4a	83	2,814	0,484	90%	G4
FG6.6a	92	2,394	0,437	91%	G4
FG6.7a	107	2,096	0,404	44%	G1
FG6.9a	129	4,384	0,657	63%	G2
FG6.11a			Rota a flexotracción tras retirar del ensayo de fatiga		
FG6.13a	188	3,920	0,606	91%	G4
FG6.14a	188	2,691	0,470	102%	G4
FG6.15a	188	2,725	0,474	116%	G4
FG6.16a	188	1,031	0,287	167%	G4
FG7.1a	181	3,518	0,561	98%	G4
FG7.3a	181	4,798	0,703	79%	G3
FG7.4a	181	4,498	0,670	72%	G3
FG8.1a	180	4,947	0,719	77%	G3
FG8.3a	180	4,748	0,697	79%	G3
FG8.4a	180	5,773	0,810	59%	G2
FG8.5a	187	4,271	0,644	86%	G4
FG8.6a	180	4,127	0,629	76%	G3
FG9.2a	204	3,454	0,698	70%	G3
FG9.3a	186	4,752	0,665	79%	G3
FG9.5a	186	4,459	0,720	83%	G4
FG9.6a	186	4,952	0,649	67%	G3
FG9.7a	204	4,313	0,713	69%	G3
FG9.8a	186	4,895	0,700	67%	G3
FG9.9a	204	4,771	0,705	64%	G2
FG9.10a	204	4,822	0,554	55%	G2
FG10.2a	131	3,508	0,560	65%	G3
FG10.3a	127	3,394	0,548	64%	G2
FG10.5a	149	3,904	0,604	72%	G3
FG11.2a	106	3,667	0,578	67%	G3
FG11.3a	113	1,715	0,362	132%	G4
FG11.4a	113	4,456	0,665	59%	G2

Es evidente que los casos en los que se ha obtenido que la probeta se ha cargado con una tensión superior o igual al 100% del valor de la resistencia a flexotracción, hay un error en la obtención de dicho valor R<sub>f</sub> estimado. Esto se debe tanto a la reducida precisión de la fórmula [2] que relaciona la resistencia a flexotracción de la probeta con la resistencia a compresión de uno de los semiprismas obtenidos de la rotura, como a que los semiprismas empleados se pueden encontrar dañados estructuralmente por el ensayo de fatiga realizado previamente, por lo que se obtiene una resistencia a flexotracción estimada muy baja.

Es el caso de las probetas denominadas FG6.14, FG6.15, FG6.16 y FG11.3 en las que, a la edad de 188 días las tres primeras y 113 días la última, los semiprismas sólo han resistido a compresión 2,69 – 2,72 – 1,03 y 1,71 MPa, por lo que la resistencia estimada a flexotracción resulta muy reducida: 0,47 MPa las dos primeras, 0,29 MPa y 0,36 MPa las dos últimas (habiendo soportado realmente 2.103.978, 42, 74 y 41.102 ciclos con carga máxima de 0,48 MPa).

De acuerdo con esta resistencia a flexotracción estimada en base a los resultados obtenidos con los semiprismas rotos a compresión de las probetas ensayadas previamente a fatiga y la relación [2], se obtiene la siguiente nube de puntos (de la cual se suprimen los valores erróneos de las cuatro probetas citadas):

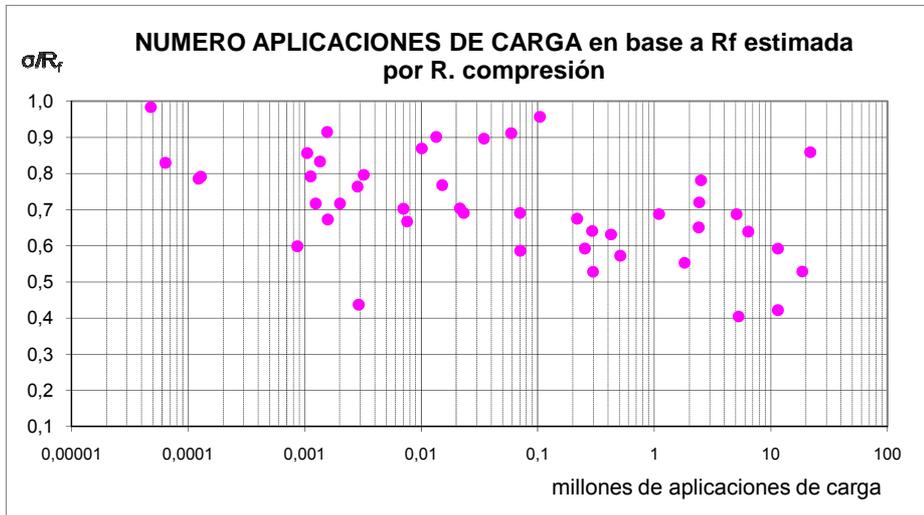


Figura 112. Número de aplicaciones de carga de acuerdo con la  $R_f$  estimada de la  $R_c$  inicial

Y realizando un proceso similar al anterior para obtener la ley de fatiga de la forma:

$$\frac{\sigma}{R_f} = 1 - a \cdot \log N$$

calculando el valor de la pendiente “a” de la recta para que sea mínima la suma de los cuadrados de la distancia a la recta de los puntos de la nube de resultados, de acuerdo con los cálculos incluidos en la tabla A2.26 del anejo 2, se obtiene:

$$65,2780 a^2 + 1.081,0694 a - 65,2780 = 0$$

resultando una pendiente

$$a = 0,06016425$$

cuyo valor incrementa algo el obtenido anteriormente, siendo la ley de fatiga de la forma:

$$\frac{\sigma}{R_f} = 1 - 0,060 \cdot \log N$$

y su representación gráfica es la siguiente:

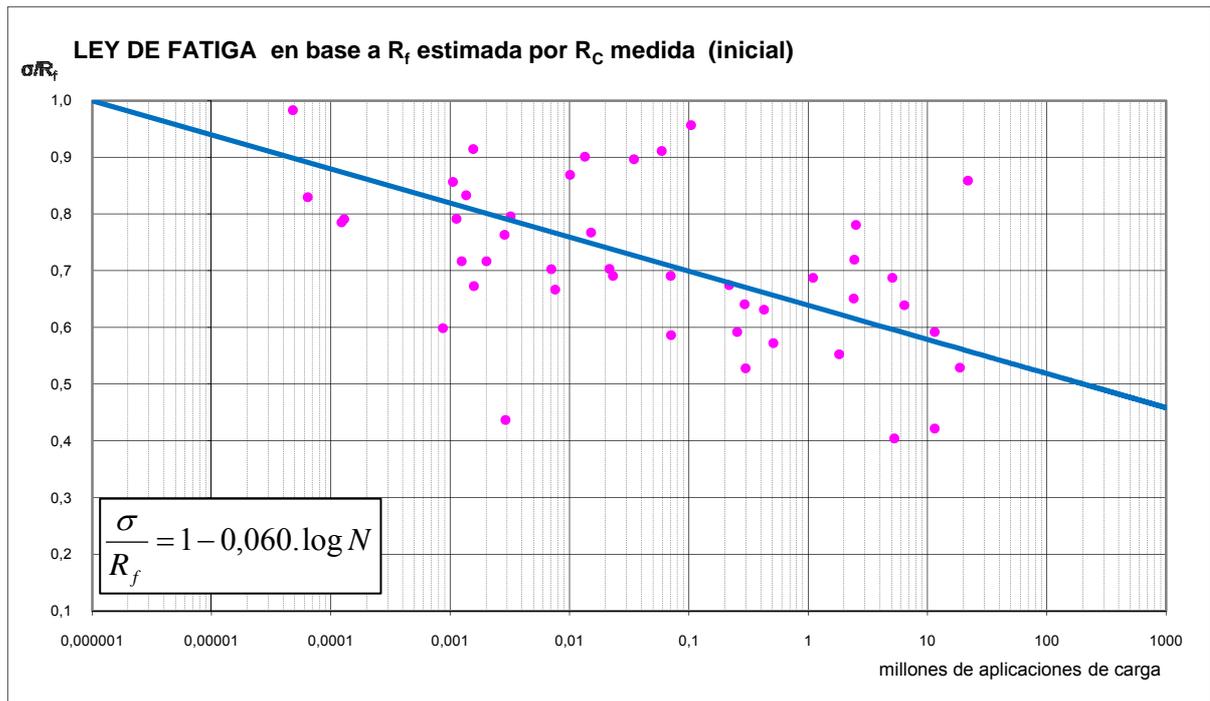


Figura 113. Ley de fatiga obtenida por estimación en base a los medios prismas rotos a compresión según fórmula inicial [2]

Ahora bien, esta ley de fatiga está obtenida en base a la relación lineal establecida en la fórmula [2] entre la resistencia a flexotracción y la resistencia a compresión cuya precisión viene dada por el valor  $R^2 = 0,4132$  ( $0,7626$  para las probetas de la 2ª fase únicamente) según se expone en el apartado 6.3.4.1.

Si en vez de considerar esta relación, se adopta la definida en este mismo apartado con una ecuación doble inversa de mucha mayor precisión ( $R^2 = 0,6388$ ) y que es de la forma:

$$R_{f,LP} = \frac{1}{0,281187 + \frac{5,40234}{R_c}} \quad [3]$$

Se modifican ligeramente los valores de resistencia a flexotracción estimados a partir de la resistencia a compresión medida en las semiprobetas, obteniéndose la siguiente nueva tabla con su correspondiente representación de nube de puntos:

Tabla 145. Porcentaje de la resistencia a flexotracción estimada a partir de los semiprismas rotos a compresión y la relación doble inversa [3]

	Días de curado	Tensión de rotura (MPa)	Resist. flexotrac. estimada a partir de la compresión	% de $R_f$ estimada con la que se ha cargado la probeta	Grupo de carga al que corresponde
FG1.1.a	90				
FG1.2.a	90				
FG1.3.a	165	3,659	0,569	97%	G4
FG1.4.a	165	3,982	0,611	90%	G4
FG1.5.a	322	3,892	0,599	58%	G2
FG1.6.a	322	4,215	0,640	70%	G3
FG2.1.a	301	4,342	0,656	68%	G3
FG2.2.a	301	4,341	0,655	68%	G3
FG2.3.a	301	4,342	0,656	53%	G2
FG2.4.a	303	4,350	0,657	53%	G2
FG2.5.a	303	4,835	0,715	77%	G3
FG2.6.a	303	4,712	0,700	79%	G3
FG3.1.a	394	6,160	0,863	40%	G1
FG3.2.a	394	5,836	0,829	42%	G1
FG3.3.a	394	4,315	0,652	69%	G3
FG3.4.a	394	5,295	0,768	58%	G2
FG3.5.a	400	4,255	0,645	86%	G4
FG3.6.a	548	4,434	0,667	83%	G4
FG4.3.a	492	4,102	0,626	88%	G4
FG4.5.a	492	4,185	0,636	87%	G4
FG4.6.a	492	4,098	0,625	72%	G3
FG5.2a	104	2,862	0,461	64%	G2
FG6.2a	79	--			G1
FG6.4a	83	2,814	0,454	95%	G4
FG6.6a	92	2,394	0,394	102%	G4
FG6.7a	107	2,096	0,350	51%	G2
FG6.9a	129	4,384	0,661	63%	G2
FG6.11a					
FG6.13a	188	3,920	0,603	92%	G4
FG6.14a	188	2,691	0,437	110%	G4
FG6.15a	188	2,725	0,442	125%	G4
FG6.16a	188	1,031	0,181	265%	G4
FG7.1a	181	3,518	0,550	100%	G4
FG7.3a	181	4,798	0,711	78%	G3
FG7.4a	181	4,498	0,675	71%	G3
FG8.1a	180	4,947	0,728	76%	G3
FG8.3a	180	4,748	0,705	78%	G3
FG8.4a	180	5,773	0,822	58%	G2
FG8.5a	187	4,271	0,647	85%	G4
FG8.6a	180	4,127	0,629	76%	G3
FG9.2a	204	3,454	0,542	72%	G3
FG9.3a	186	4,752	0,705	78%	G3
FG9.5a	186	4,459	0,670	82%	G4
FG9.6a	186	4,952	0,729	66%	G3
FG9.7a	204	4,313	0,652	69%	G3
FG9.8a	186	4,895	0,722	66%	G3
FG9.9a	204	4,771	0,707	63%	G2
FG9.10a	204	4,822	0,713	55%	G2
FG10.2a	131	3,508	0,549	66%	G3
FG10.3a	127	3,394	0,534	65%	G3
FG10.5a	149	3,904	0,601	72%	G3
FG11.2a	106	3,667	0,570	68%	G3
FG11.3a	113	1,715	0,291	165%	G4
FG11.4a	113	4,456	0,670	58%	G2

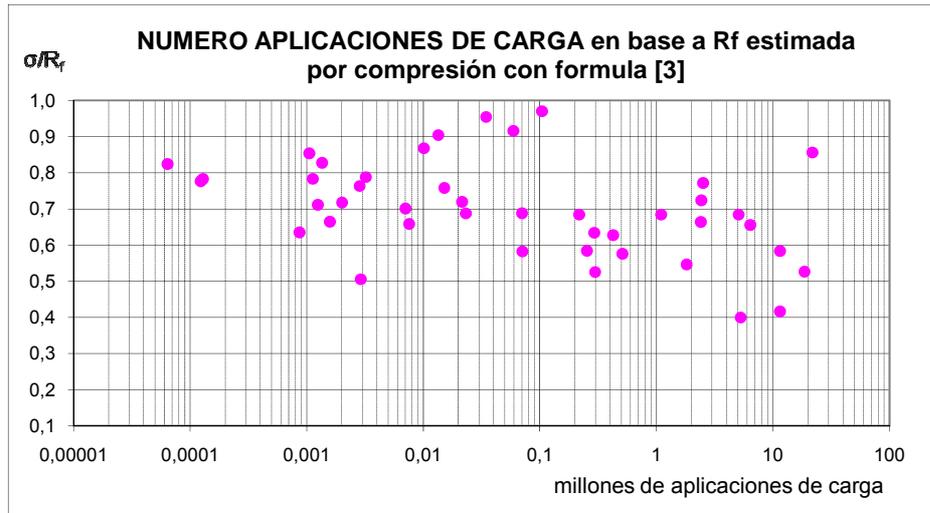


Figura 114. Número de aplicaciones de carga de acuerdo con la  $R_f$  estimada de la  $R_c$  según formula [3]

Y sustituyendo los valores correspondientes ( $P_1, P_2$ ) a cada punto ( $\sigma/R_f, \log N$ ) en la fórmula [1] se obtiene la nueva pendiente de la ley de fatiga de acuerdo con los cálculos incluidos en la tabla A2.27 del anejo 2, cuyo resultado es:

$$64,6382 a^2 + 1.068,1048 a - 64,6382 = 0$$

obteniéndose una pendiente

$$a = 0,06029670$$

y por tanto una ley de fatiga de la forma:

$$\frac{\sigma}{R_f} = 1 - 0,06029670 \cdot \log N$$

o de manera simplificada

$$\frac{\sigma}{R_f} = 1 - 0,060 \cdot \log N$$

cuya representación gráfica es la siguiente:

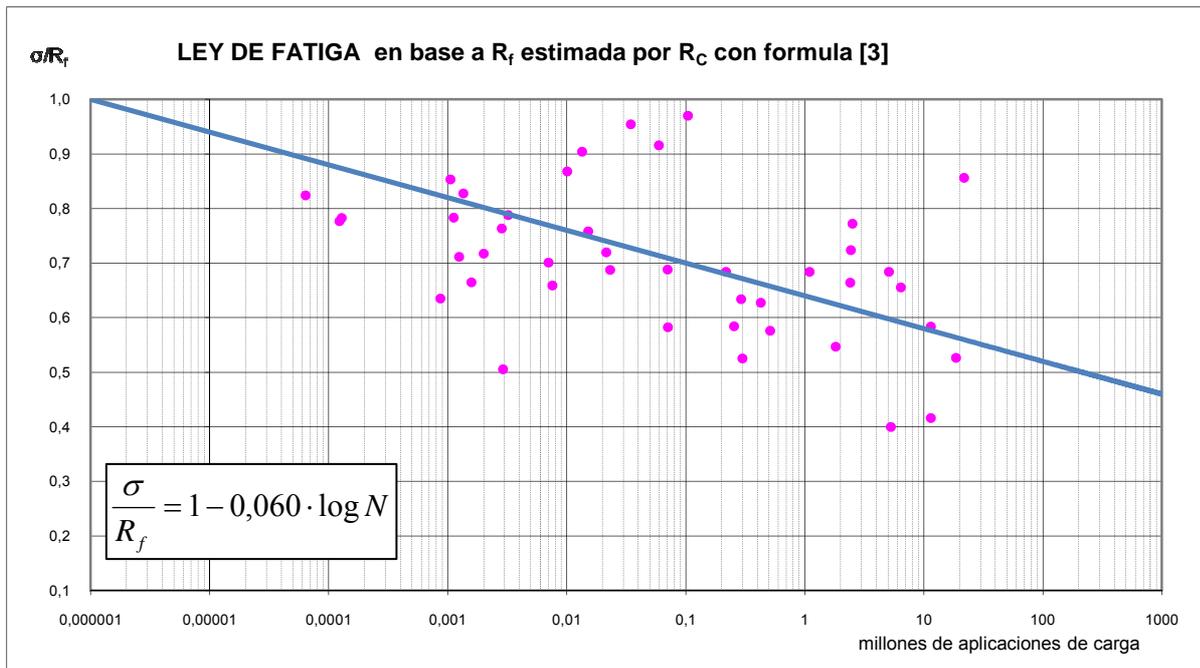


Figura 115. Ley de fatiga obtenida por estimación en base a los medios prismas rotos a compresión según fórmula [3]

Si en vez de considerar la ecuación doble inversa que se ha considerado para relacionar la resistencia a flexotracción con la resistencia a compresión, se elige la ecuación doble inversa de mayor precisión ( $R^2 = 0,7235$ ) correspondiente a discretizar algunos valores y que es de la forma:

$$R_{f,LP} = \frac{1}{0,442802 + \frac{5,08112}{R_c}} \quad [4]$$

Los valores de resistencia a flexotracción estimados a partir de la resistencia a compresión medida en las semiprobetas cambian, obteniéndose la siguiente tabla, cuya representación supone la siguiente nube de puntos:

Tabla 146. Porcentaje de la resistencia a flexotracción estimada a partir de los semiprismas rotos a compresión y la relación doble inversa corregida [4]

	Días de curado	Tensión de rotura (MPa)	Resist. flexotracc. estimada a partir de la compresión	% de $R_f$ estimada con la que se ha cargado la probeta	Grupo de carga al que corresponde
FG1.1.a	90				
FG1.2.a	90				
FG1.3.a	165	3,659	0,546	101%	G4
FG1.4.a	165	3,982	0,582	95%	G4
FG1.5.a	322	3,892	0,572	60%	G2
FG1.6.a	322	4,215	0,607	74%	G3
FG2.1.a	301	4,342	0,620	72%	G3
FG2.2.a	301	4,341	0,620	72%	G3
FG2.3.a	301	4,342	0,620	56%	G2
FG2.4.a	303	4,350	0,621	56%	G2
FG2.5.a	303	4,835	0,669	82%	G4
FG2.6.a	303	4,712	0,657	84%	G4
FG3.1.a	394	6,160	0,789	44%	G1
FG3.2.a	394	5,836	0,761	45%	G1
FG3.3.a	394	4,315	0,617	73%	G3
FG3.4.a	394	5,295	0,713	63%	G2
FG3.5.a	400	4,255	0,611	90%	G4
FG3.6.a	548	4,434	0,629	88%	G4
FG4.3.a	492	4,102	0,595	93%	G4
FG4.5.a	492	4,185	0,604	91%	G4
FG4.6.a	492	4,098	0,594	75%	G3
FG5.2a	104	2,862	0,451	65%	G2
FG6.2a	79	--			
FG6.4a	83	2,814	0,445	97%	G4
FG6.6a	92	2,394	0,390	103%	G4
FG6.7a	107	2,096	0,349	51%	G2
FG6.9a	129	4,384	0,624	66%	G3
FG6.11a					
FG6.13a	188	3,920	0,575	96%	G4
FG6.14a	188	2,691	0,429	112%	G4
FG6.15a	188	2,725	0,433	127%	G4
FG6.16a	188	1,031	0,186	258%	G4
FG7.1a	181	3,518	0,530	104%	G4
FG7.3a	181	4,798	0,666	83%	G4
FG7.4a	181	4,498	0,636	75%	G3
FG8.1a	180	4,947	0,680	81%	G4
FG8.3a	180	4,748	0,661	84%	G4
FG8.4a	180	5,773	0,756	63%	G2
FG8.5a	187	4,271	0,613	90%	G4
FG8.6a	180	4,127	0,597	80%	G4
FG9.2a	204	3,454	0,523	75%	G3
FG9.3a	186	4,752	0,661	84%	G4
FG9.5a	186	4,459	0,632	87%	G4
FG9.6a	186	4,952	0,681	70%	G3
FG9.7a	204	4,313	0,617	73%	G3
FG9.8a	186	4,895	0,675	71%	G3
FG9.9a	204	4,771	0,663	68%	G3
FG9.10a	204	4,822	0,668	58%	G2
FG10.2a	131	3,508	0,529	69%	G3
FG10.3a	127	3,394	0,515	68%	G3
FG10.5a	149	3,904	0,573	76%	G3
FG11.2a	106	3,667	0,547	71%	G3
FG11.3a	113	1,715	0,294	163%	G4
FG11.4a	113	4,456	0,632	62%	G2

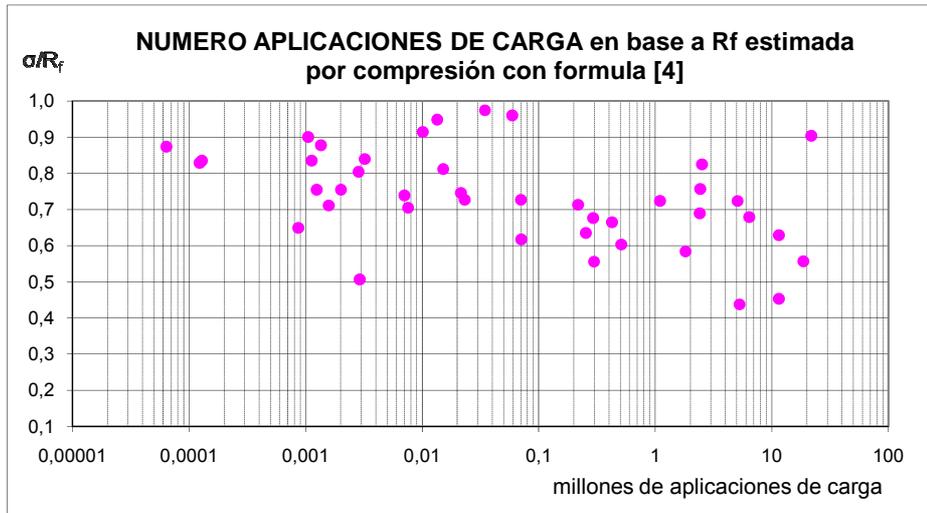


Figura 116. Número de aplicaciones de carga de acuerdo con la  $R_f$  estimada de la  $R_c$  según fórmula [4]

Y sustituyendo los valores correspondientes ( $P_1$ ,  $P_2$ ) a cada punto ( $\sigma/R_f$ ,  $\log N$ ) en la fórmula [1] se obtiene la nueva pendiente de la ley de fatiga de acuerdo con los cálculos incluidos en la tabla A2.28 del anejo 2, cuyo resultado es:

$$59,1996 a^2 + 1.040,9966 a - 59,1996 = 0$$

obteniéndose una pendiente

$$a = 0,05668549$$

y una ley de fatiga de la forma:

$$\frac{\sigma}{R_f} = 1 - 0,05668549 \cdot \log N$$

que de manera simplificada queda:

$$\frac{\sigma}{R_f} = 1 - 0,057 \cdot \log N$$

la representación gráfica resulta:

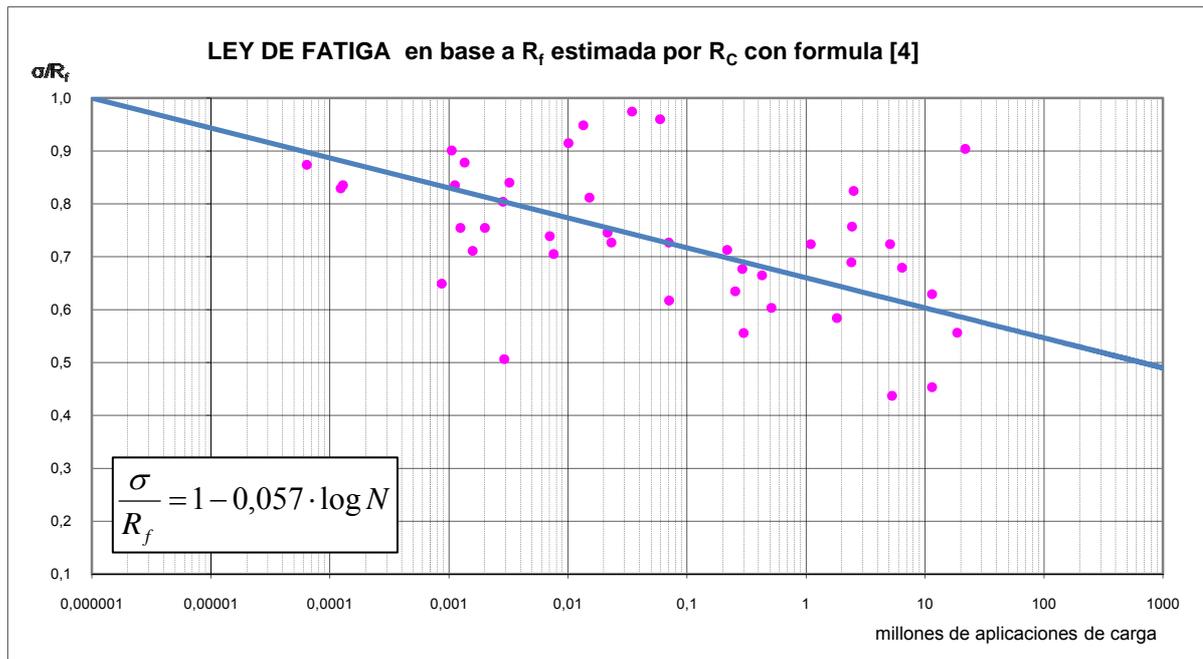


Figura 117. Ley de fatiga obtenida por estimación en base a los medios prismas rotos a compresión según fórmula [4]

**6.6.3. Ley de fatiga deducida de los semiprismas rotos a tracción indirecta**

De manera similar, se obtiene la resistencia a flexotracción estimada a partir de la resistencia a tracción indirecta obtenida en las semiprobetas que resultaron de la rotura a fatiga. Para ello se emplea la relación establecida entre ambas variables en los ensayos realizados con las probetas prismáticas rotas a flexotracción y expuestos en el apartado 6.3.4.2, que viene definida a largo plazo por la expresión:

$$R_{f,LP} = 1,0321 R_{ti,LP} + 0,1916 \quad [5]$$

obteniéndose la siguiente resistencia a flexotracción estimada para cada probeta:

Tabla 147. Resistencia a flexotracción estimada en base a la resistencia obtenida a tracción indirecta

Probeta nº	Días de curado	Edad media (días)	R tracción indirecta (MPa)	$R_{ti}$ media (MPa)	Resist. flexotrac. estimada a partir de tracción indirecta	Resist. flexotrac. media estimada
FG6.2b	79	90	0,317	0,315	0,519	0,517
FG6.4b	83		0,294		0,495	
FG1.1.b	90					
FG1.2.b	90					
FG6.6b	92		0,333		0,536	
FG5.2b	104	109	0,246	0,329	0,446	0,531
FG11.2b	106		0,336		0,539	
FG6.7b	107		0,033		0,225	
FG11.3b	113		0,448		0,654	
FG11.4b	113		0,285		0,485	
FG6.9b	129	137	0,407	0,359	0,612	0,563
FG10.2b	131		0,380		0,584	
FG10.3b	139		0,302		0,504	
FG10.5b	149		0,348		0,551	

Probeta n°	Días de curado	Edad media (días)	R tracción indirecta (MPa)	R <sub>i</sub> media (MPa)	Resist. flexotrac. estimada a partir de tracción indirecta	Resist. flexotrac. media estimada
FG1.3.b	165	165	0,434	0,445	0,640	0,651
FG1.4.b	165		0,456		0,662	
FG6.11b	181	186	0,405	0,358	0,610	0,561
FG9.3b	186		0,335		0,537	
FG9.5b	186		0,053		0,246	
FG9.6b	186		0,130		0,326	
FG9.8b	186		0,253		0,452	
FG8.5b	187		0,370		0,574	
FG8.3b	187		0,498		0,706	
FG8.4b	187		0,451		0,657	
FG7.3b	188		0,251		0,450	
FG7.4b	188		0,299		0,501	
FG8.6b	196	196	0,384	0,390	0,588	0,594
FG8.1b	196		0,349		0,551	
FG7.1b	197		0,437		0,643	
FG6.13b	204	204	0,391	0,406	0,595	0,610
FG6.14b	204		0,289		0,490	
FG6.15b	204		0,222		0,421	
FG6.16b	204		0,215		0,414	
FG9.2b	204		0,412		0,616	
FG9.7b	204		0,468		0,675	
FG9.9b	204		0,416		0,621	
FG9.10b	204		0,459		0,665	
FG2.1.b	301	302	0,541	0,498	0,750	0,706
FG2.2.b	301		0,473		0,680	
FG2.3.b	301		0,375		0,579	
FG2.4.b	303		0,465		0,672	
FG2.5.b	303		0,408		0,613	
FG2.6.b	303		0,728		0,943	
FG1.5.b	322	322	0,317	0,341	0,518	0,543
FG1.6.b	322		0,365		0,568	
FG3.1.b	394	394	0,490	0,424	0,697	0,629
FG3.2.b	394		0,419		0,624	
FG3.3.b	394		0,403		0,607	
FG3.4.b	394		0,321		0,523	
FG3.5.b	400		0,485		0,692	
FG4.3.b	492	492	0,317	0,381	0,519	0,585
FG4.5.b	492		0,445		0,651	
FG4.6.b	492		0,231		0,430	
FG3.6.b	548	548	0,251		0,450	

Y expresado de forma gráfica, la resistencia a flexotración estimada a partir de la rotura a tracción indirecta crece con la edad de las probetas de acuerdo a la siguiente nube de puntos:

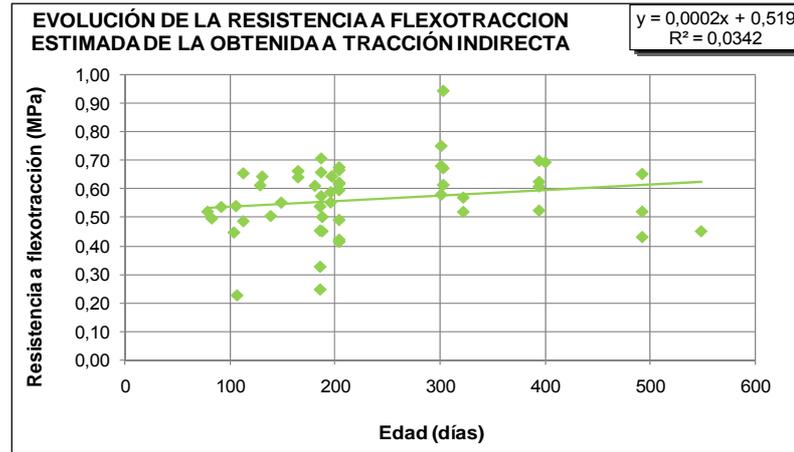


Figura 118. Evolución de la resistencia a flexotracción estimada de la resistencia medida a tracción indirecta

La resistencia a flexotracción obtenida estimanda a partir de los semiprismas rotos a tracción indirecta modifica la relación  $\sigma/R_f$  inicialmente prevista y los grupos de rotura. Se calcula a continuación el porcentaje de la nueva resistencia a flexotracción calculada, con el que se ha cargado realmente cada probeta y el grupo de rotura en el que se encuentra (añadiéndose el mismo grupo G4 que en el apartado 6.6.2 compresión):

Tabla 148. Porcentaje de la resistencia a flexotracción estimada a partir de los semiprismas rotos a compresión y la relación lineal [5]

Probeta nº	Días de curado	Tensión de rotura (MPa)	Resist. flexotrac. estimada a partir de tracción indirecta	% de $R_f$ estimada con la que se ha cargado la probeta	Grupo de carga al que corresponde
FG1.1.b	90				
FG1.2.b	90				
FG1.3.b	165	0,434	0,640	86%	G4
FG1.4.b	165	0,456	0,662	83%	G4
FG1.5.b	322	0,317	0,518	67%	G3
FG1.6.b	322	0,365	0,568	79%	G3
FG2.1.b	301	0,541	0,750	60%	G2
FG2.2.b	301	0,473	0,680	66%	G3
FG2.3.b	301	0,375	0,579	60%	G2
FG2.4.b	303	0,465	0,672	51%	G2
FG2.5.b	303	0,408	0,613	90%	G4
FG2.6.b	303	0,728	0,943	59%	G2
FG3.1.b	394	0,490	0,697	49%	G1
FG3.2.b	394	0,419	0,624	55%	G2
FG3.3.b	394	0,403	0,607	74%	G3
FG3.4.b	394	0,321	0,523	86%	G4
FG3.5.b	400	0,485	0,692	80%	G3
FG3.6.b	548	0,251	0,450	123%	G4
FG4.3.b	492	0,317	0,519	106%	G4
FG4.5.b	492	0,445	0,651	85%	G4
FG4.6.b	492	0,231	0,430	104%	G4
FG5.2b	104	0,246	0,446	66%	G3
FG6.2b	79	0,317	0,519	83%	G4
FG6.4b	83	0,294	0,495	88%	G4
FG6.6b	92	0,333	0,536	75%	G3
FG6.7b	107	0,033	0,225	79%	G3
FG6.9b	129	0,407	0,612	68%	G3
FG6.11b	181	0,405			
FG6.13b	204	0,391	0,595	93%	G4
FG6.14b	204	0,289	0,490	98%	G4

Probeta nº	Días de curado	Tensión de rotura (MPa)	Resist. flexotrac. estimada a partir de tracción indirecta	% de $R_f$ estimada con la que se ha cargado la probeta	Grupo de carga al que corresponde
FG6.15b	204	0,222	0,421	131%	G4
FG6.16b	204	0,215	0,414	116%	G4
FG7.1b	197	0,437	0,643	86%	G4
FG7.3b	188	0,251	0,450	123%	G4
FG7.4b	188	0,299	0,501	96%	G4
FG8.1b	196	0,349	0,551	100%	G4
FG8.3b	187	0,498	0,706	78%	G3
FG8.4b	187	0,451	0,657	73%	G3
FG8.5b	187	0,370	0,574	96%	G4
FG8.6b	196	0,384	0,588	82%	G4
FG9.2b	204	0,412	0,616	63%	G2
FG9.3b	186	0,335	0,537	103%	G4
FG9.5b	186	0,053	0,246	224%	G4
FG9.6b	186	0,130	0,326	147%	G4
FG9.7b	204	0,468	0,675	66%	G3
FG9.8b	186	0,253	0,452	106%	G4
FG9.9b	204	0,416	0,621	72%	G3
FG9.10b	204	0,459	0,665	59%	G2
FG10.2b	131	0,437	0,642	57%	G2
FG10.3b	139	0,302	0,504	69%	G3
FG10.5b	149	0,348	0,551	79%	G3
FG11.2b	106	0,336	0,539	72%	G3
FG11.3b	113	0,448	0,654	73%	G3
FG11.4b	113	0,285	0,485	80%	G4

De la misma forma que sucedía en la resistencia a flexotracción estimada a partir de los semiprismas rotos a compresión, existe error en la estimación de la resistencia a flexotracción en aquellas probetas en las que se obtiene que se ha cargado con un porcentaje de resistencia igual o superior al 100% de la resistencia a flexotracción obtenida en la estimación.

Se eliminan por tanto los resultados correspondientes a las probetas FG3.6 (con una resistencia a flexotracción estimada de la rotura a tracción indirecta de 0,450 MPa), FG4.3 (0,519 MPa), FG4.6 (0,430 MPa), FG6.15 (0,421 MPa), FG6.16 (0,414 MPa), FG7.3 (0,450 MPa), FG8.1 (0,551), FG9.3 (0,537 MPa), FG9.5 (0,246 MPa), FG9.6 (0,326 MPa) y FG9.8 (0,452 MPa), que como se puede comprobar, se han obtenido valores de resistencia a flexotracción estimados muy bajos para la edad de las probetas.

La resistencia a flexotracción estimada en base a los resultados obtenidos con los semiprismas rotos a tracción indirecta del resto de las probetas ensayadas previamente a fatiga, es la siguiente:

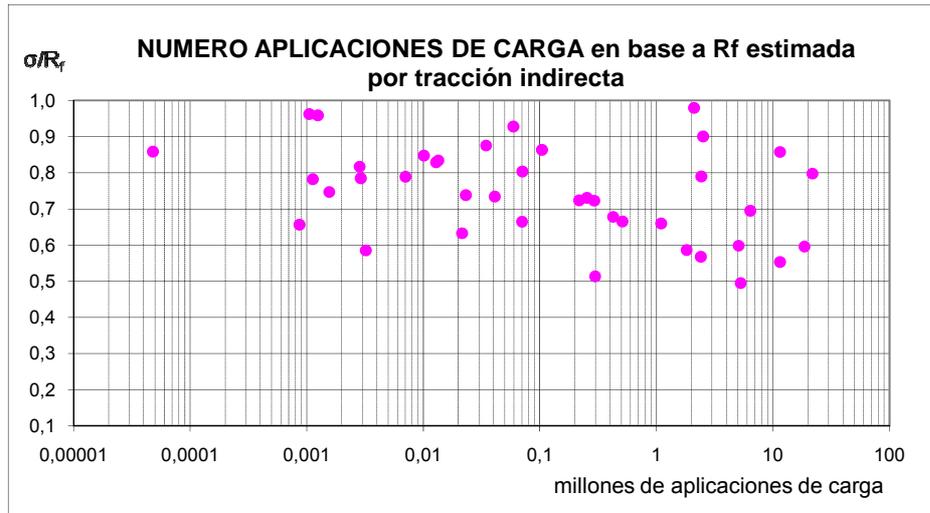


Figura 119. Número de aplicaciones de carga de acuerdo con la  $R_f$  estimada de la  $R_{fi}$  obtenida

Y de manera similar a los casos anteriores, la pendiente “a” de la recta para que sea mínima la suma de los cuadrados de la distancia de los puntos a la recta, de acuerdo con los cálculos incluidos en la tabla A2.29 del anejo 2, se obtiene:

$$53,1335 a^2 + 1.068,1886 a - 53,1335 = 0$$

resultando la pendiente

$$a = 0,04961921$$

y resultando la ley de fatiga obtenida a partir de los resultados de los semiprismas rotos a tracción indirecta de la forma:

$$\frac{\sigma}{R_f} = 1 - 0,050 \cdot \log N$$

que es de pendiente algo inferior a la determinada con los ensayos de fatiga realizados en el laboratorio. Su representación gráfica viene dada por:

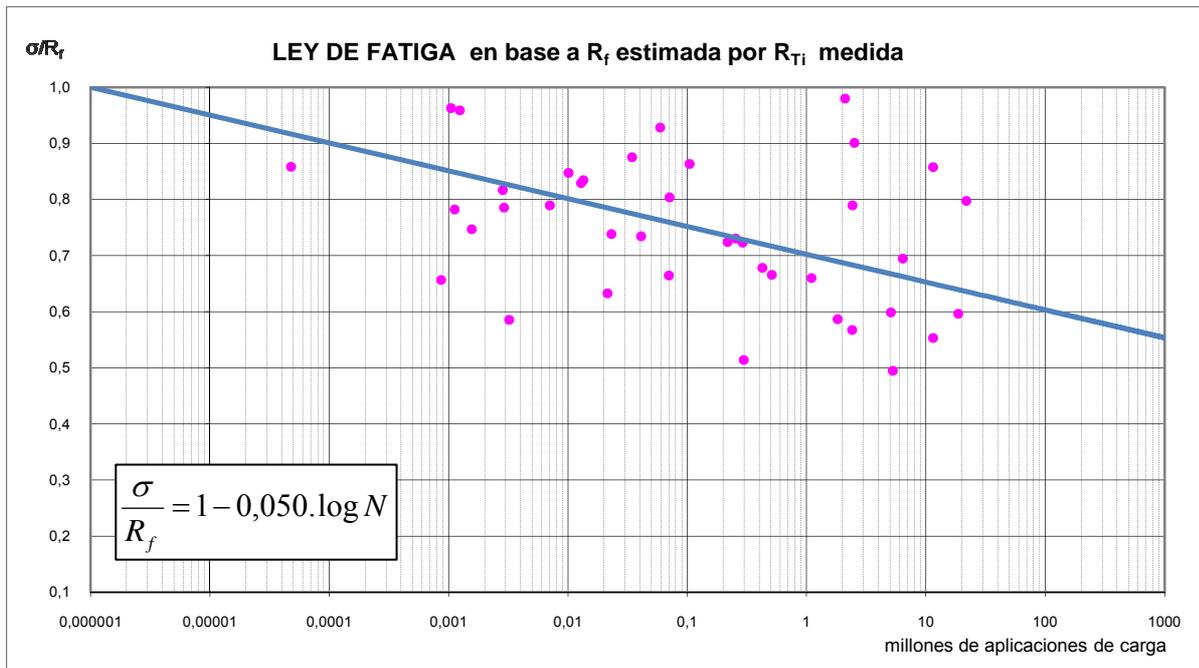


Figura 120. Ley de fatiga obtenida por estimación en base a los medios prismas rotos a tracción indirecta según fórmula [5] inicial

Si se analizan los valores anteriores obtenidos de resistencia a flexotracción, se observa que en la probeta FG6.7, con 103 días de curado, se obtiene una resistencia a tracción indirecta de tan solo 0,033 MPa, por lo que la resistencia a flexotracción estimada es tan sólo de 0,225 MPa. Evidentemente, este medio prisma debía estar dañado del ensayo previo a fatiga en el cual aguantó 2.913 ciclos. Si se discretiza este valor y se sustituyen de nuevo los valores correspondientes a cada punto en la fórmula [1] se obtiene la nueva pendiente de la ley de fatiga de acuerdo con los cálculos incluidos en la tabla A2.30 del anejo 2, cuyo resultado es:

$$52,3891 a^2 + 1.056,2331 a - 52,3891 = 0$$

obteniéndose una pendiente

$$a = 0,04947855$$

y por tanto una ley de fatiga de la forma:

$$\frac{\sigma}{R_f} = 1 - 0,04947855 \cdot \log N$$

o de manera simplificada

$$\frac{\sigma}{R_f} = 1 - 0,049 \cdot \log N$$

cuya representación gráfica es la siguiente:

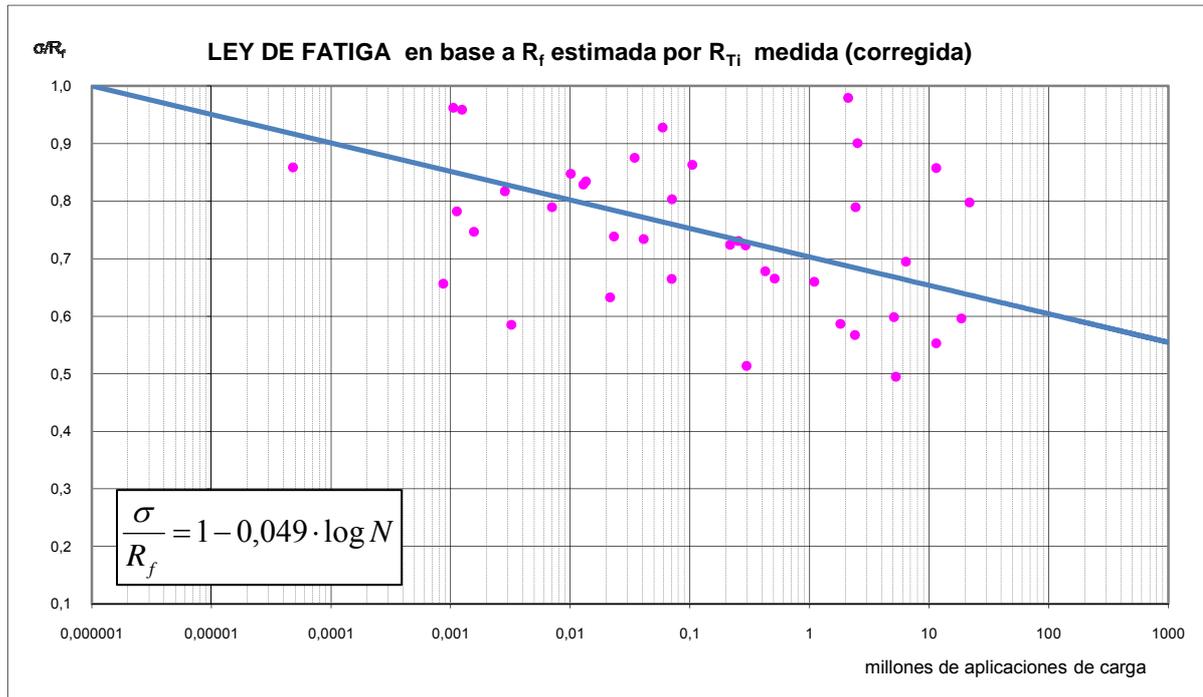


Figura 121 . Ley de fatiga obtenida por estimación en base a los medios prismas rotos a tracción indirecta según fórmula [5] corregida

#### 6.6.4. Ley de fatiga del material reciclado

Según puede apreciarse en los apartados anteriores, hay ligeras diferencias en el segundo decimal de la pendiente de las leyes obtenidas. De forma resumida los resultados de la pendiente en cada caso han sido:

Tabla 149. Pendiente de las leyes de fatiga de material reciclado obtenidas

Ley de fatiga obtenida de	Pendiente "a"
Ensayos de fatiga probetas prismáticas	0,05931144
Ensayos de fatiga probetas prismáticas (corregido)	0,05775497
Resistencia flexotracción estimada a partir de la compresión por relación lineal [2]	0,06016425
Resistencia flexotracción estimada a partir de la compresión por relación doble inversa [3]	0,06029670
Resistencia flexotracción estimada de la compresión por relación doble inversa corregido [4]	0,05668549
Resistencia flexotracción estimada a partir de la tracción indirecta por relación lineal [5]	0,04961921
Resistencia flexotracción estimada a partir de la tracción indirecta (corregido)	0,04947855

Como se desprende de los cálculos realizados, la ley de fatiga del material reciclado obtenida directamente de los ensayos de fatiga tiene una pendiente de 0,059, y si se discretizan los valores posiblemente erróneos, se reduce a 0,058.

Si se consideran las leyes de fatiga deducidas de los semiprismas rotos a compresión, estimando la resistencia a flexotracción tanto por una relación lineal, como por una doble inversa, se obtiene una pendiente 0,060, que se reduce a 0,057 si se discretizan los posibles valores erróneos.

Por otro lado, se puede observar que los resultados obtenidos de la pendiente en base a la resistencia a flexotracción estimada a partir de la resistencia a tracción indirecta no están en sintonía con el resto de los valores. Esto se debe a que las resistencias a flexotracción estimadas resultan muy reducidas para este tipo de materiales (valor medio  $R_f = 0,565$  MPa), debido a que los valores a tracción obtenidos también resultan reducidos (valor medio  $R_{ti} = 0,361$  MPa) quizás por estar dañadas las semiprobetas en el ensayo previo de fatiga, a lo que podría sumarse que la relación establecida en la ecuación [5] para estas dos variables podría no resultar completamente válida (a pesar de resultar la más precisa con un valor  $R^2 = 0,6087$ ).

Por todo ello, no se van a considerar las pendientes obtenidas en base a la resistencia a flexotracción estimada a partir de la resistencia a tracción indirecta medida en los semiprismas rotos previamente a fatiga.

El resto de resultados obtenidos son de similar orden de magnitud y corroboran el valor de la pendiente  $a = 0,05775497$  obtenido en los ensayos de fatiga realizados durante estos dos años (de junio de 2008 a junio de 2010), una vez que se han corregido los posibles resultados irregulares.

Este valor de 0,058 (se pueden suprimir el resto de decimales al carecer todo el proceso de una precisión mayor), coincide además con el valor medio que se obtiene de todas las pendientes calculadas y reflejadas en la tabla anterior, y coincide también con el valor medio de las pendientes obtenidas únicamente con los valores una vez corregidos, sin considerar los deducidos de tracción indirecta.

Así pues, se considera buena la ley de fatiga determinada para el material reciclado con cemento representada por la relación:

$$\frac{\sigma}{R_f} = 1 - 0,058 \cdot \log N$$

y cuya representación gráfica se incluye en la siguiente figura:

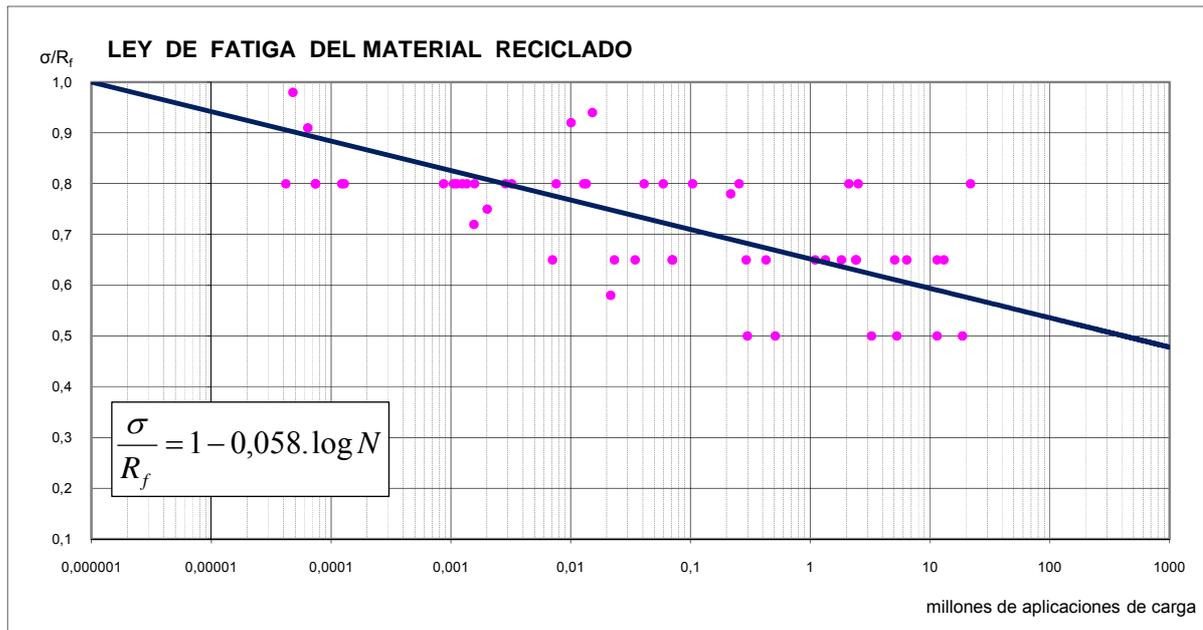


Figura 122. Ley de fatiga del material reciclado

**6.6.5. Comparación de la ley de fatiga obtenida con otras leyes de fatiga**

Hasta la fecha no hay noción de que se haya realizado un estudio como el presente para determinar la ley de fatiga de los materiales reciclados con cemento en cualquiera de sus proporciones. Es previsible que una variación importante en el porcentaje de mezcla bituminosa de la capa reciclada pueda variar ligeramente la expresión de la ley calculada. No obstante, en las diferentes normativas españolas se recogen leyes de fatiga de materiales granulares tratados con cemento, situación que se corresponde con una capa reciclada sin ningún aporte de mezcla bituminosa. Las diferentes leyes incluidas para el suelocemento (SC) y la gravacemento (GC) son:

Tabla 150. Leyes de fatiga en diferentes normativas

$\sigma/R_f$	$R_f$	Normativa
1-0,080.logN	No definida	SC M. Fomento. Norma 6.1-IC <sup>(1)</sup>
		SC Junta de Castilla y León <sup>(7)</sup>
	0,90	SC Manual capas tratadas CEDEX – IECA <sup>(18)</sup>
1-0,0875.logN	No definida	SC M. Fomento. Norma 6.3-IC <sup>(2)</sup>
1-0,065.logN	No definida	GC M. Fomento. Norma 6.1-IC <sup>(1)</sup>
		GC Junta de Castilla y León <sup>(7)</sup>
	1,60	GC Manual capas tratadas CEDEX – IECA <sup>(18)</sup>
	0,72 / 1,30	SC / GC Junta de Andalucía <sup>(20)</sup>
	0,83	SC Gobierno País Vasco <sup>(72)</sup>
	0,72 / 1,28 si tráfico > T2 0,90 / 1,60 si tráfico < T2	SC / GC Generalitat Valenciana <sup>(73)</sup>

La ley de fatiga determinada es la de forma:

$$\frac{\sigma}{R_f} = 1 - 0,058 \cdot \log N$$

Se observa claramente que el aporte del material bituminoso existente en la carretera permite obtener un material más flexible, de módulo más reducido, pero de mejor comportamiento a fatiga al permitir un mayor número de aplicaciones de carga en cualquier relación tensión aplicada / tensión de rotura.

En la representación gráfica de las diferentes leyes de fatiga se puede apreciar que la ley obtenida para el material reciclado tiene una pendiente muy inferior a la considerada para el suelocemento en la normativa del Ministerio de Fomento, y algo inferior a la de la gravacemento, de acuerdo con la ley obtenida en el Instituto Eduardo Torroja hace casi cuatro décadas, y que es la empleada por la mayoría de las normativas autonómicas españolas. Esta ley se asemeja más a la ley de fatiga de la gravacemento por la estructura granular del material reciclado (aunque no en sus resistencias, ni en el módulo), en contra de la opinión conservadora empleada por algunos calculistas de asemejar el material reciclado al suelocemento.

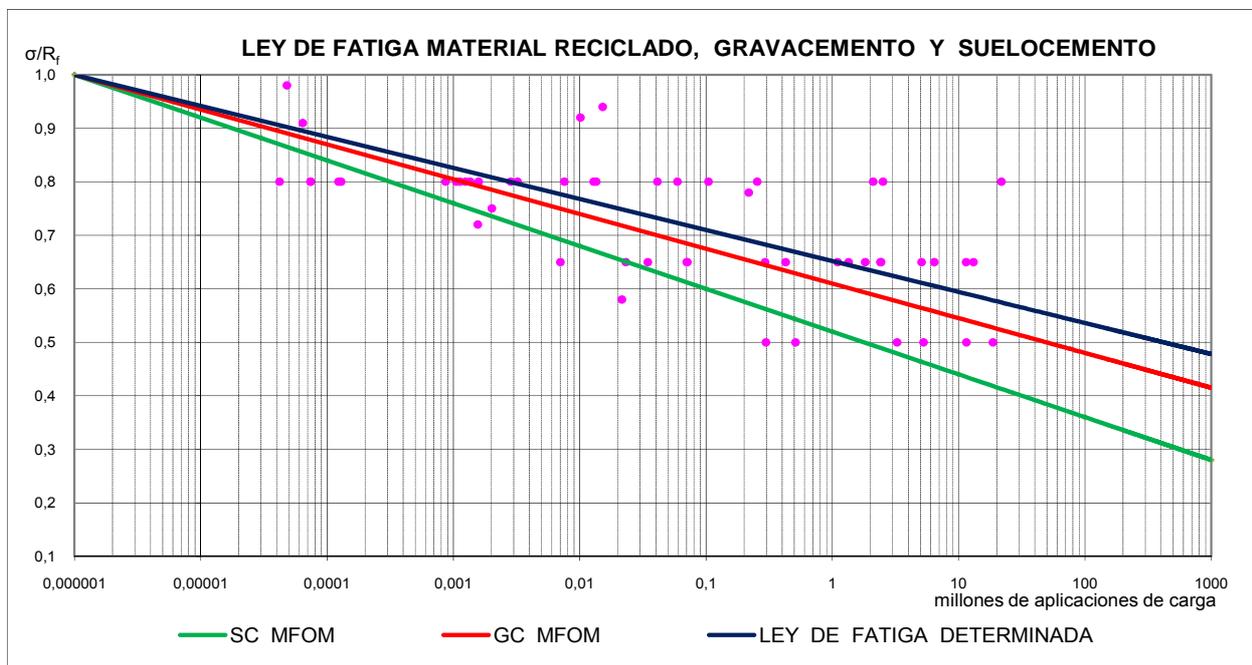


Figura 123. Leyes de fatiga de suelocemento, gravacemento y material reciclado

Puede apreciarse que la menor pendiente de la ley de fatiga obtenida viene acompañada de una menor rigidez de este material que tiene menor módulo, por lo que el comportamiento a fatiga del material reciclado es mejor, con una mayor deformación elástica recuperable debido al conjunto de finos que forman el mortero bituminoso.

Comparando la ley de fatiga con las obtenidas en el programa experimental de Koliás, Katsakou y Koloidas, Mechanical properties of flexible pavement material recycled with cement<sup>(36)</sup>, se observa que la ley obtenida tiene menor pendiente que la obtenida por dichos autores para mezclas 0/100 es decir todo material bituminoso, similar pendiente que la obtenida para la mezcla 50/50 (material granular/material bituminoso), y mayor pendiente que la obtenida con material granular reciclado con cemento (tipo 100/0), que no coincide con las leyes de fatiga empleadas en España para el suelocemento o la gravacemento (conviene recordar que estas leyes obtenidas por Koliás no pueden considerarse en términos cuantitativos dado el escaso número de probetas ensayadas).

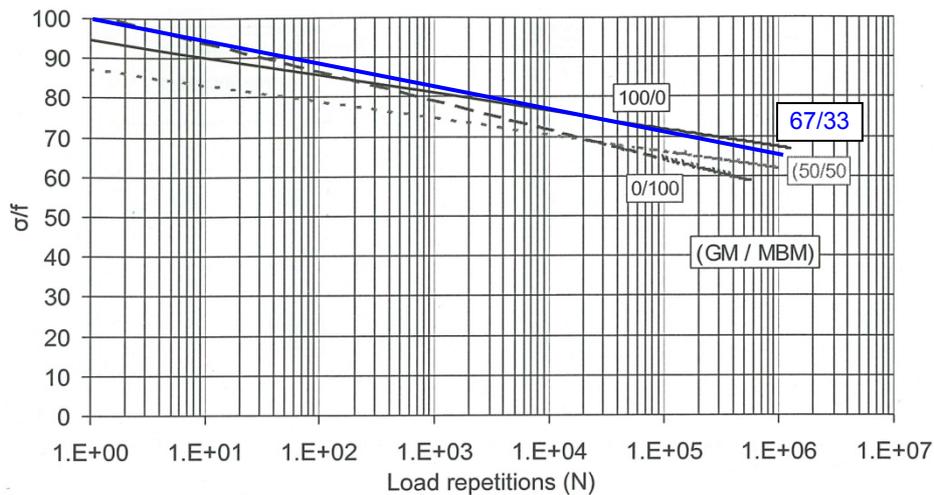


Figura 124. Comparación leyes de fatiga obtenidas por Koliás con la obtenida en la tesis

### 6.7. CÁLCULO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL MATERIAL

El módulo de elasticidad de una capa de firme es indicativo de su capacidad de reparto de tensiones, tanto hacia las capas inferiores, en caso de existir, como a la explanada. A igualdad de espesor, cuanto mayor es dicho módulo, las deflexiones que se originan son más reducidas y uniformes, sin valores máximos acusados bajo los puntos de aplicación de las cargas<sup>(46)</sup>.

En general, los materiales tratados con cemento presentan un comportamiento elástico marcadamente lineal al menos hasta alcanzar un porcentaje importante de su tensión de rotura, y su módulo de elasticidad se puede considerar prácticamente constante en el rango de tensiones dentro del cual suelen trabajar. De acuerdo con el manual de firmes de capas tratadas con cemento<sup>(18)</sup>, los valores habituales del módulo de elasticidad (dinámico) a largo plazo de materiales tratados con cemento puede variar desde 5.000 a 8.000 MPa para un suelocemento fabricado con suelos granulares y desde 8.000 a 18.000 MPa para un suelocemento fabricado con zahorras. De hecho, la gráfica de relación entre los valores de módulo dinámico y los valores de resistencia a compresión que aparece en dicho manual, es la siguiente:

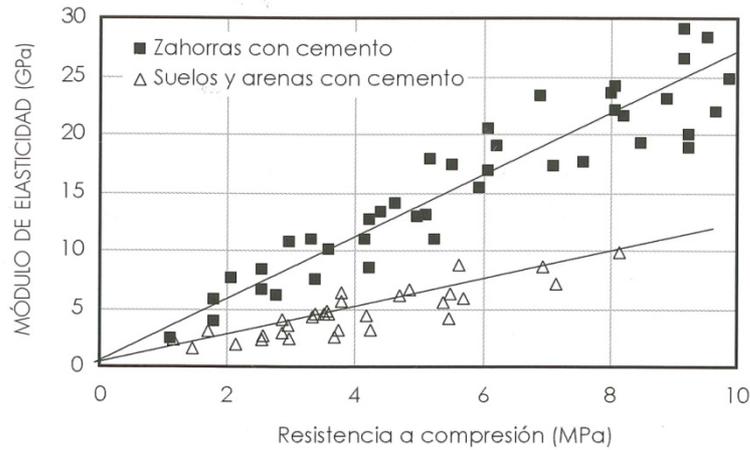


Figura 125. Relación módulo – resistencia a compresión para distintas mezclas con cemento según Manual CEDEX – IECA<sup>(18)</sup>

En el estudio realizado por el CEDEX de los firmes con suelocemento en Castilla y León y publicado en la revista Carreteras<sup>(70)</sup> se establece la siguiente relación entre el módulo de deformación E y la resistencia a compresión Rc:

$$E = 1165,4 R_c$$

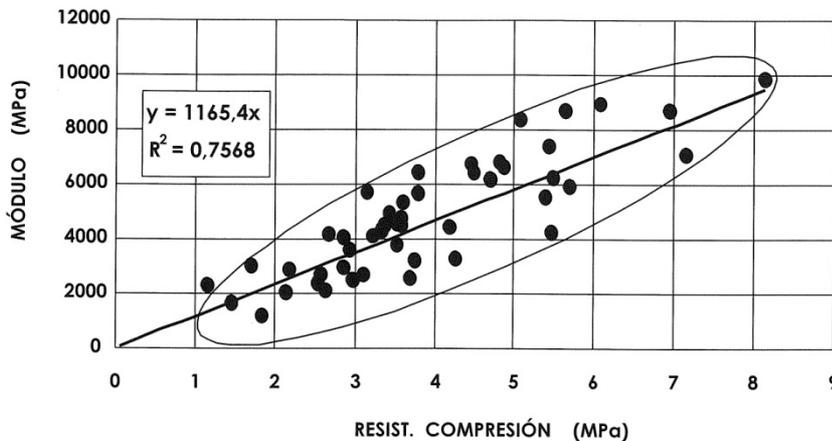


Figura 126. Relación módulo – resistencia a compresión para distintos suelocemento medidos en carreteras de la Junta de Castilla y León por el CEDEX<sup>(70)</sup>

Es decir, que para una resistencia a compresión de 3,96 MPa obtenida en estos ensayos en probeta cilíndrica a largo plazo le correspondería un módulo de 4.600 MPa, y para la resistencia a compresión de 4,15 MPa obtenida en el semiprisma roto previamente a flexotracción, se obtendría 4.800 MPa de módulo.

De la bibliografía consultada y según se expone en los apartados 3.3 y 3.4, los módulos dinámicos medidos son muy variables con valores desde 2.900 hasta 15.000 MPa, dependiendo lógicamente de las características del material reciclado. Este rango tan amplio se recoge también en la estimación del módulo<sup>(68)</sup> y en las propiedades elásticas medidas por Williams en el Reino Unido<sup>(69)</sup>.

En la carretera N-630, tramo Cañaveral sur – Límite de Provincia de Salamanca en el año 1996 se obtuvieron módulos para el material reciclado que variaban desde 5.400 a 8.400 MPa (fuera de la zorra aportada), si bien hubo dos testigos que dieron 2.900 y 4.300 MPa. Posteriormente en el año 2010, se han vuelto a extraer testigos obteniendo módulos que varían entre 4.500 y 15.600 MPa y resistencias a compresión muy altas, entre 5,8 y 12,3 MPa. Considerando que estos valores corresponden a una muestra seleccionada con los testigos en mejores condiciones y parte de ellos proceden de parte de la carretera en la que hubo aportación de zorra artificial antes de reciclar, el módulo dinámico esperado de un material reciclado puede encontrarse entre 4.000 y 7.000 MPa.

Aplicando las relaciones  $E/R_c$  obtenidas en dicha obra para el material reciclado en estudio ( $R_c = 4,15$  MPa), se obtiene un módulo de 4.679 MPa de acuerdo con la relación obtenida en los testigos extraídos al año, y un módulo de 6.390 MPa según la relación obtenida en los testigos extraídos a los 15 años (en el 2010).

Si se aplica la relación  $E/R_{ti}$  obtenida en estos testigos para la resistencia a tracción máxima obtenida de 0,437 MPa se obtiene un módulo de 5.465 MPa.

Los módulos obtenidos en los testigos extraídos en la N-431, en el tramo Huelva – Cartaya, resultaron con valores comprendidos entre 3.600 y 11.200 MPa, con un valor medio de 6.283 MPa.

En este trabajo de investigación y como ya se comentó en el apartado 5.7, ante la carencia en el laboratorio de la Escuela Politécnica de Burgos de una prensa servohidráulica capaz de aplicar cargas cíclicas sinusoidales, que permitiera a la vez gravar de forma automática los valores de carga y desplazamiento medidos por los extensómetros, se decidió medir el módulo estático.

De acuerdo con el manual de firmes de capas tratadas con cemento<sup>(18)</sup> publicado por CEDEX-IECA, el módulo dinámico suele dar valores entre un 10 y un 15% más altos que el módulo estático.

Para el ensayo se emplearon 15 probetas fabricadas en moldes de  $\varnothing 15,24 \times 17,78$  cm, de las cuales se ensayaron 3 probetas a la edad de 7 días (denominadas M.5.7, M.5.8 y M.5.9) con una velocidad de carga de 8,83 KN/s, y otras 12 probetas (M.5.3 y M.5.4 con una edad de 240 días, M.4.1, M.4.9, M.5.1, M.5.2, M.5.5, M.5.6, con más de un año de edad y M.4.2, M.4.5, M.4.6 y M.4.8 con más de dos años en la cámara), todas estas a una velocidad de 4,26 KN/s. Todos los módulos se midieron a partir de ensayos de compresión y no de tracción directa.

Un primer problema que se planteó fue que en todos los casos se debería usar probetas o testigos con una esbeltez (relación longitud-diámetro) superior a 1,5 de acuerdo con la norma ASTM C469-94 standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression<sup>(65)</sup> o bien superior o igual a 2 según la NLT-349/90<sup>(48)</sup>, y en

nuestro caso, las probetas disponibles eran de 17,78 cm de longitud y 15,24 cm de diámetro, es decir una esbeltez de 1,17 ya que sólo se disponía de dichos moldes.

Se ha considerado como módulo de elasticidad, el valor de la pendiente de la recta que viene determinada por los dos puntos definidos con el 40% de la carga máxima y con una deformación unitaria  $\epsilon = 0,00005$ , según indica la citada norma ASTM es decir:

$$E = \frac{\sigma(\text{de } 40\% Q \text{ rotura}) - \sigma(\text{de } \epsilon = 0,00005)}{\epsilon(\text{debida a } 40\% Q \text{ rotura}) - 0,00005}$$

No obstante, para un mayor conocimiento del comportamiento se ha determinado también la pendiente de la tangente en el tramo inicial de la curva tensión-deformación ( $\sigma-\epsilon$ ).

Los resultados medidos han sido:

Tabla 151. Resultados de módulos de elasticidad estáticos medidos en probetas de Ø 15,24 x 17,78 cm

Probeta	Edad	Pendiente de la tangente	Módulo estático (MPa)	Observaciones
M.5.7	7 días	3.273	1.896	
M.5.8	7 días	4.617	3.502	
M.5.9	7 días	3.609	2.591	
M.5.4	235 días	3.109	1.569	
M.5.3	246 días	3.465	2.445	
M.4.1	393 días	918	607	fallo
M.5.2	474 días	3.290	1.147	
M.5.5	474 días	3.330	2.287	
M.5.1	481 días	712	690	
M.5.6	481 días	801	691	
M.4.9	627 días	--	148	Coquera interior
M.4.2	873 días	238	115	Defectuosa
M.4.5	873 días	117	127	Defectuosa
M.4.6	873 días	84	92	Defectuosa
M.4.8	873 días	104	107	Defectuosa

Si se analizan los resultados se comprueba que de una forma ilógica se obtienen módulos más altos a 7 días que a edades mayores. Esto en mi opinión obedece a problemas que ha debido haber con las probetas en la cámara. La representación gráfica de las curvas tensión-deformación obtenidas en los ensayos de rotura a compresión son las siguientes:

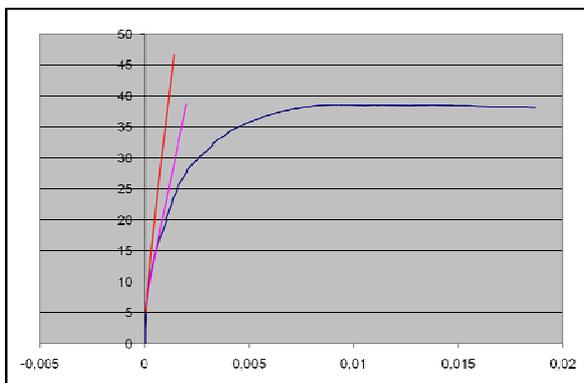


Figura 127. Módulo de elasticidad probeta M.5.7

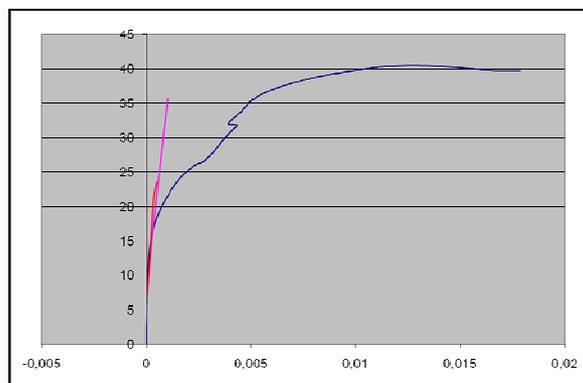


Figura 128. Módulo de elasticidad probeta M.5.8

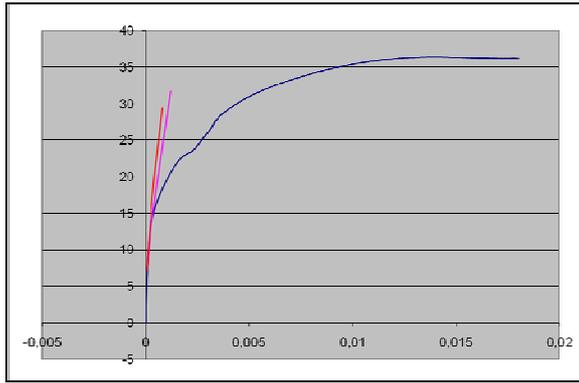


Figura 129. Módulo de elasticidad probeta M.5.9

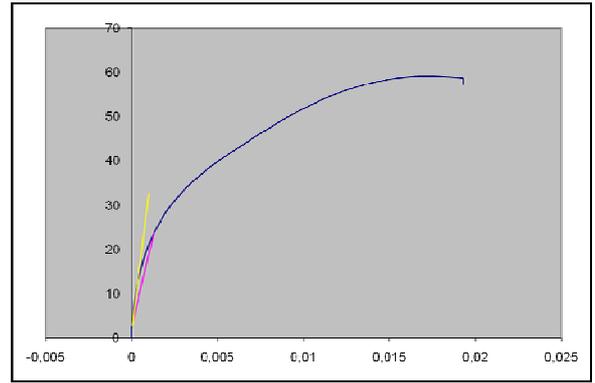


Figura 130. Módulo de elasticidad probeta M.5.4

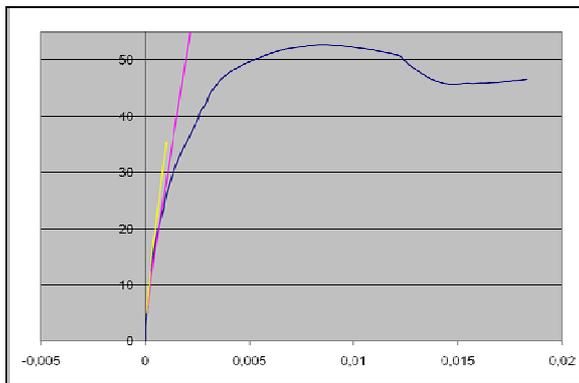


Figura 131. Módulo de elasticidad probeta M.5.3

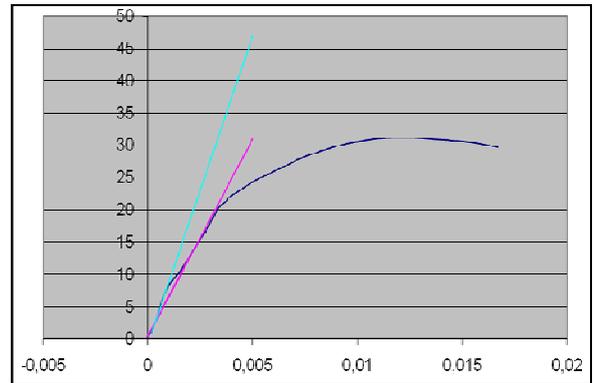


Figura 132. Módulo de elasticidad probeta M.4.1

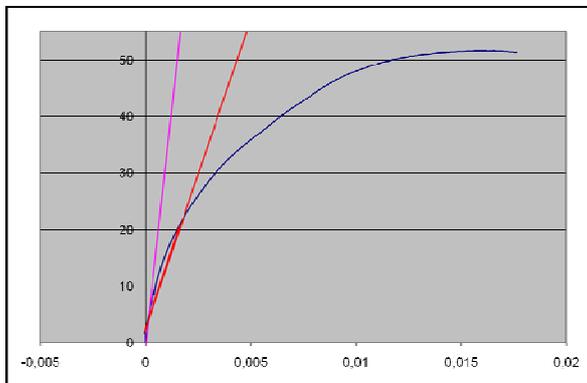


Figura 133. Módulo de elasticidad probeta M.5.2

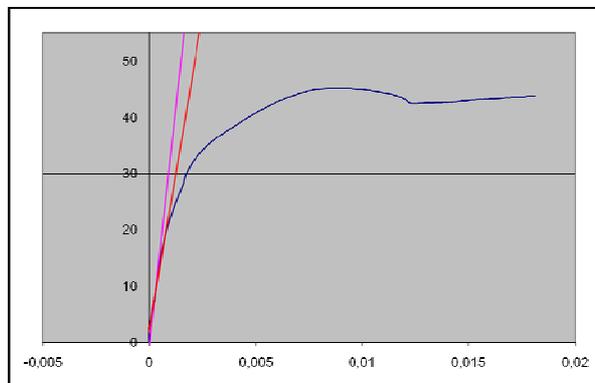


Figura 134. Módulo de elasticidad probeta M.5.5

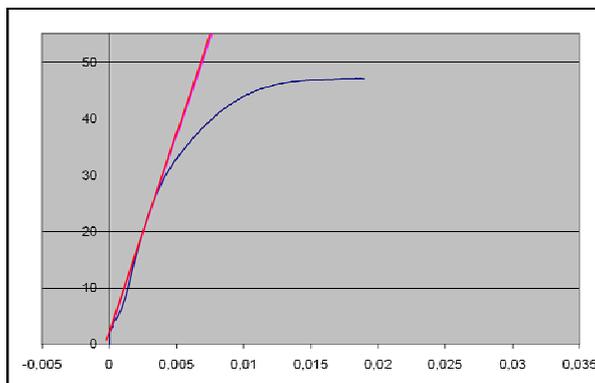


Figura 135. Módulo de elasticidad probeta M.5.1

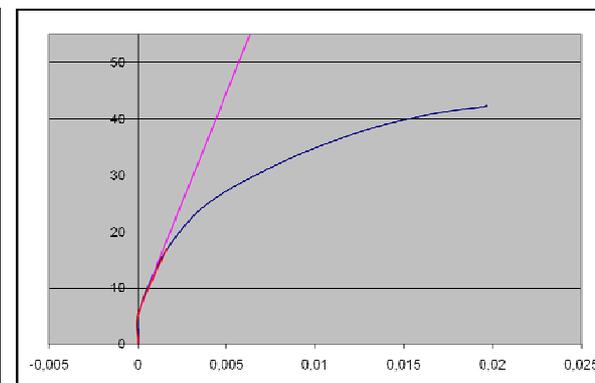


Figura 136. Módulo de elasticidad probeta M.5.6

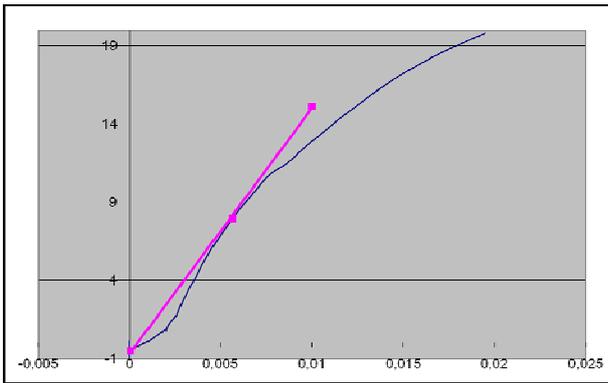


Figura 137. Módulo de elasticidad probeta M.4.9

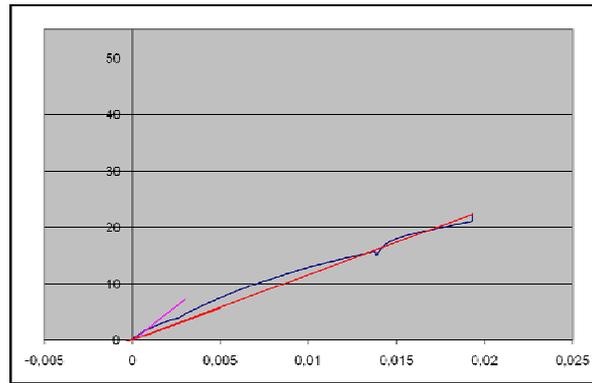


Figura 138. Módulo de elasticidad probeta M.4.2

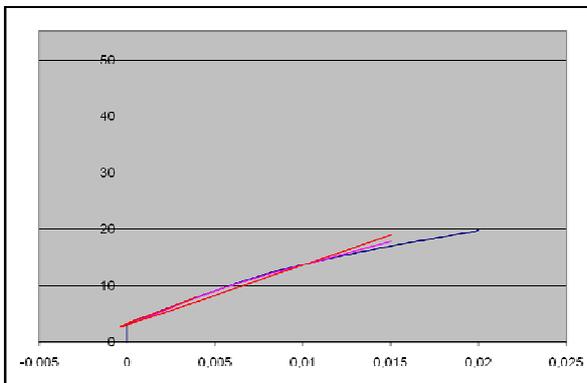


Figura 139. Módulo de elasticidad probeta M.4.5

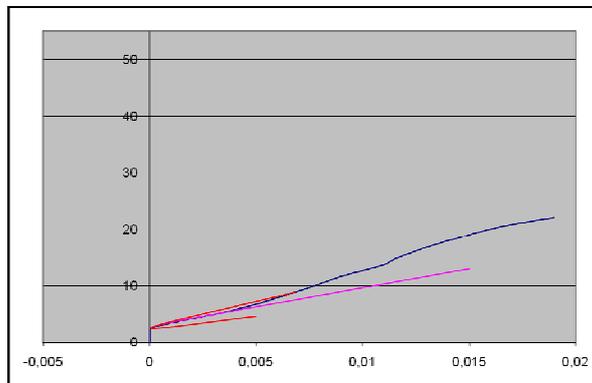


Figura 140. Módulo de elasticidad probeta M.4.6

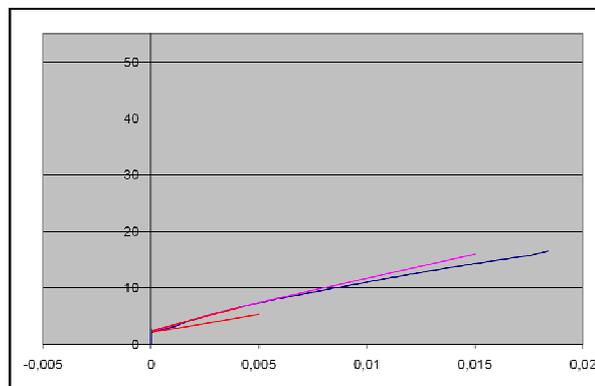


Figura 141. Módulo de elasticidad probeta M.4.8

En el caso de considerar el módulo como la pendiente de la recta tangente en el intervalo elástico los módulos obtenidos son superiores resultando módulos entre 3.109 y 4.617 (retirando los valores defectuosos). Así por ejemplo en las probetas M.5.4 y M.5.3 se obtienen valores de 3.190 y 3.465 MPa respectivamente, cuando solo se obtenían 1.569 MPa y 2.445 MPa si se aplica la norma ASTM C469-94<sup>(65)</sup>.

Puede observarse que las probetas M.5.7, M.5.8 y M.5.9 ensayadas a la edad de 7 días tienen un comportamiento aceptable, mientras las que han permanecido en la cámara por

mucho más tiempo presentan algunos defectos que reducen considerablemente el módulo estático medido (no se ha podido precisar si se ha producido algún problema en la cámara de curado, pues a partir de los 250 días los resultados ilógicamente se reducen).

A esta situación hay que añadir que la esbeltez no es superior a 1,5 por lo que puede que no haya compresión pura en el centro de la probeta, lo que limita la veracidad del ensayo (como comprobación se ensayó una probeta de hormigón de Ø 15 x 30 cm de esbeltez 2 obteniéndose un módulo correcto de 27.000 MPa).

Así pues si se considera el valor medio del módulo estático medido a los 7 días que resulta ser 2.663 MPa y se considera el coeficiente de mayoración citado para obtener el módulo dinámico (15% superior), este módulo a la edad de 7 días será 3.000 MPa. Con los coeficientes de maduración obtenidos en las bibliografías ya citadas<sup>(14 a 16)</sup> se obtiene un módulo de elasticidad dinámico del material reciclado a largo plazo a considerar de 5.000 MPa.

Todos estos resultados se encuentran en el orden de magnitud de los valores medidos por el CEDEX para la Junta de Castilla y León incluidos en el informe “evaluación del comportamiento de los tramos de carretera construidos con firmes de suelocemento en la red autonómica de carreteras de Castilla y León” y publicados en la revista Carreteras (noviembre-diciembre de 2003)<sup>(70)</sup> y Cemento y Hormigón (abril de 2002)<sup>(71)</sup>. Los valores obtenidos del módulo, que se midieron entonces sobre diferentes tipos de suelocemento, fueron:

Tabla 152. Resultados de módulos de elasticidad dinámicos medidos en suelocemento de carreteras de Castilla y León

Tipo de suelo en el suelocemento	Nº de testigos	Módulo dinámico medio (MPa)	Rc (MPa)
Arena	25	4.800	3,9
Arena + gruesos	15	3.200	3,5
Jabre	15	3.700	4,1
Suelo seleccionado	8	7.000	4,1
Zahorras	21	10.300	6,1

Considerando que en un reciclado se dispone de áridos semejantes a una zahorra mezclada con finos cubiertos de una película bituminosa, que los resultados anteriores pueden estar mayorados al medirse sólo los testigos que se extraen en perfectas condiciones y tienen buenas características (desechándose los defectos), y que en el reciclado además hay un porcentaje de betún residual que permite un buen comportamiento estructural pero reduce claramente el módulo de elasticidad, se puede considerar que el valor de módulo de elasticidad dinámico considerado en el reciclado de unos 5.000 MPa resulta apropiado.

Este valor coincide con los módulos dinámicos medidos si se tiene en cuenta que la resistencia a compresión a largo plazo obtenida es del orden de 4,0 MPa. Los módulos medidos este año 2010 en testigos extraídos de la Ruta de la Plata N-630 alcanzan valores que

varían entre 4.500 y 15.600 MPa pero hay que señalar que las resistencias obtenidas son muy superiores (varían entre 5,8 y 12,3 MPa) al haberse aportado zahorra artificial en el firme de las márgenes de la carretera antes del reciclado.

No ha sido posible medir las deformaciones axiales de las probetas sometidas a los ensayos de cálculo del módulo por lo que no se puede determinar el coeficiente de Poisson. Normalmente, se suele adoptar en los cálculos analíticos un coeficiente de Poisson de 0,25 para todos los tipos de materiales tratados con cemento y será el que se considere para este material reciclado. Si bien, en el caso de suelos muy finos y de poca estructura granular (que no es el caso) puede resultar un coeficiente algo superior, el valor que se considere tiene poca influencia en la estimación de las tensiones provocadas por las cargas.

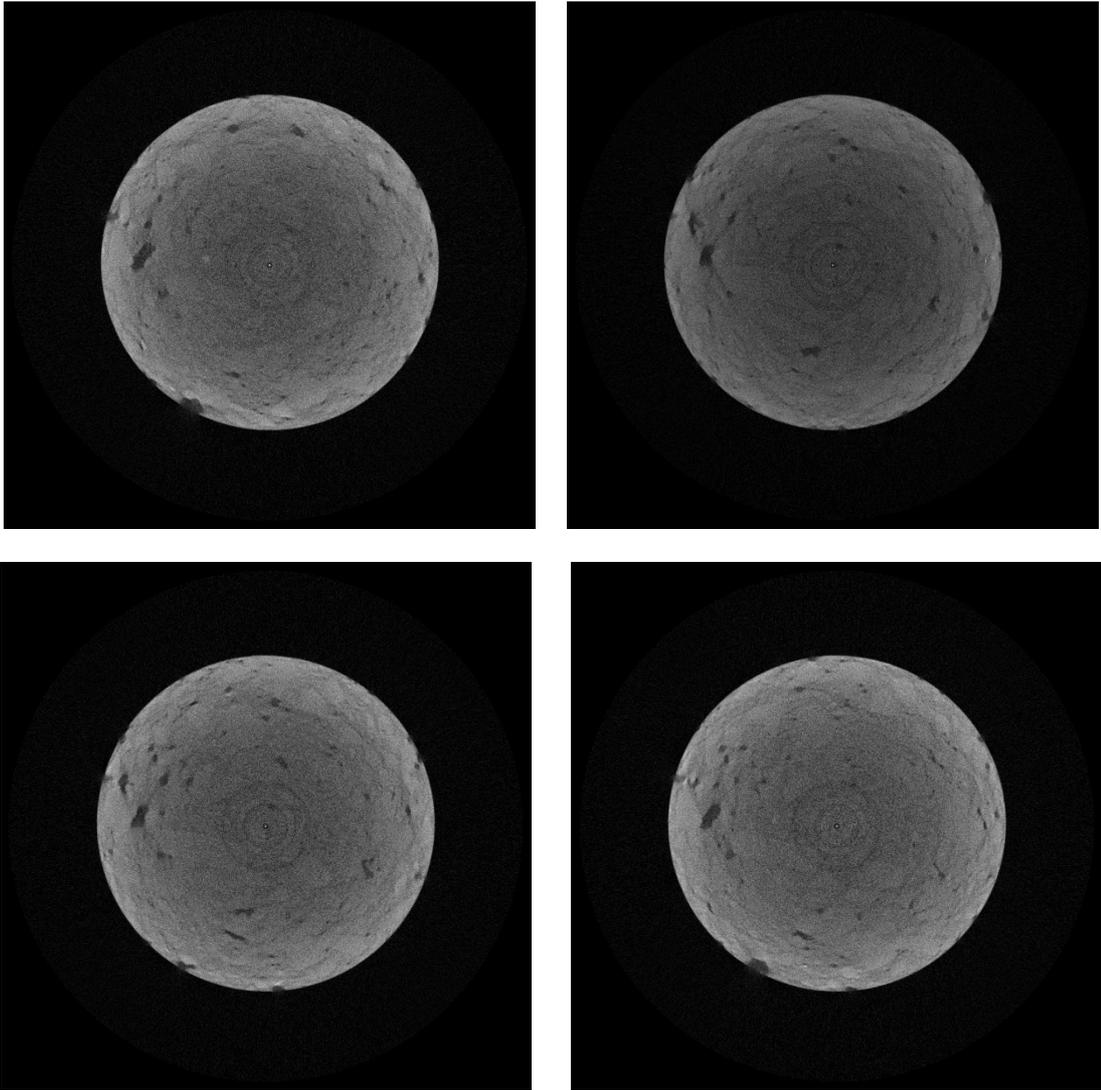
## **6.8. RESULTADOS DE LA TOMOGRAFÍA AXIAL COMPUTERIZADA**

Las tomografías se realizaron sobre 2 probetas cilíndricas (A.1.2 y A.1.6) dispuestas una sobre otra colocadas en la base móvil, gracias a la cual se obtiene una tomografía helicoidal que permite la reconstrucción volumétrica de las probetas.

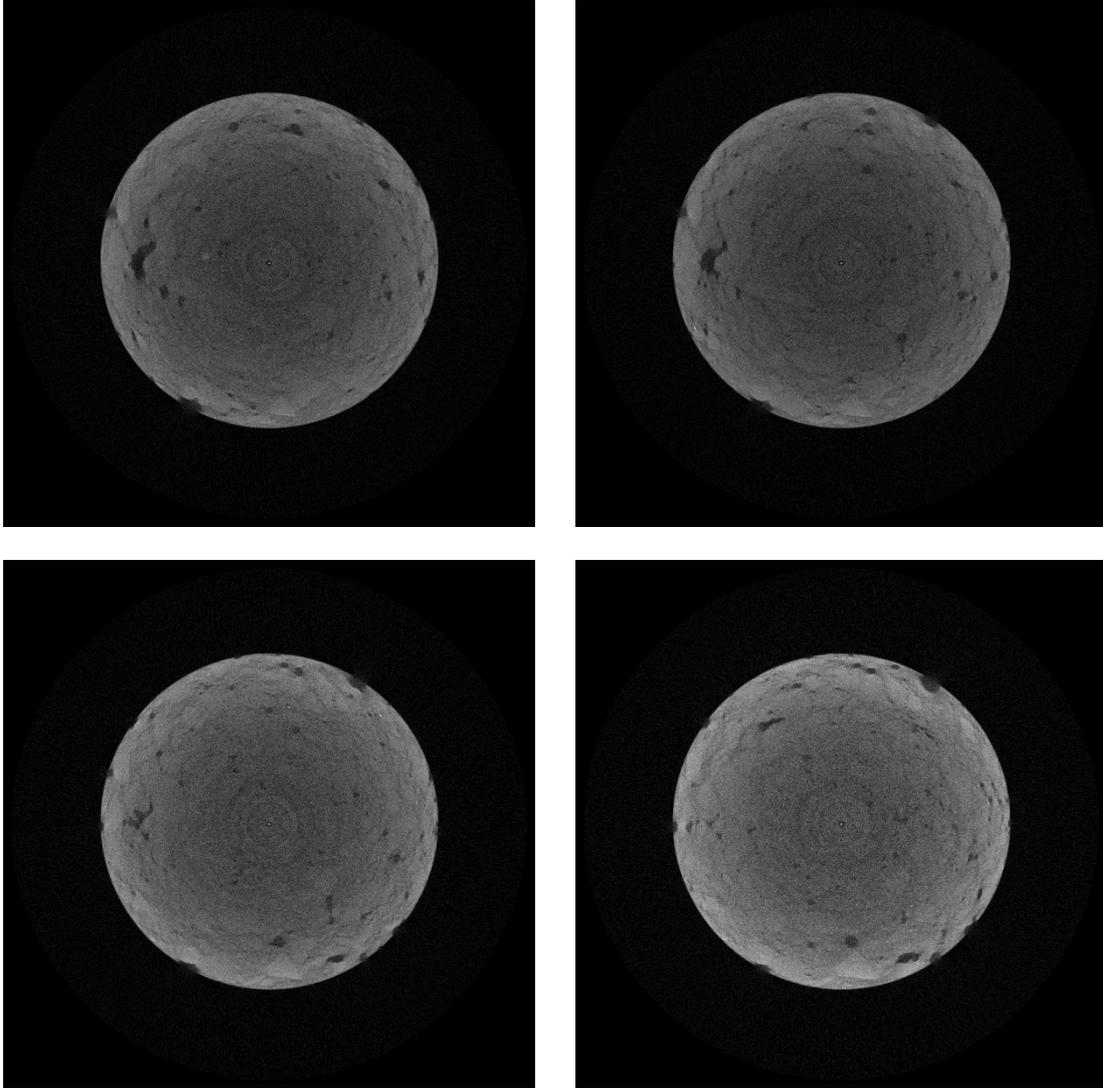
No se ha podido realizar la tomografía de las probetas después de su rotura para comparar con la situación previa porque cambia la sección al romper. Por este motivo sólo se han realizado dos ensayos de tomografía que han permitido observar la porosidad interna de las mismas antes de su rotura.

Cuanto más claro es el color, mayor es la densidad alcanzada. En las imágenes se puede apreciar que la densidad en la parte exterior es mayor que en la parte interior. Se pueden ver también los poros en un tono negro.

A continuación se muestran las imágenes de las tomografías realizadas a las probetas cilíndricas A1.2 y A1.6 respectivamente.



Fotos 107 a 110. Imagen obtenida mediante Tomografía Axial Computerizada probeta A 1.2



Fotos 111 a 114. Imagen obtenida mediante Tomografía Axial Computerizada probeta A 1.6

## CAPÍTULO 7



## DIMENSIONAMIENTO DE SECCIONES RECICLADAS IN SITU CON CEMENTO



## **7. DIMENSIONAMIENTO DE SECCIONES RECICLADAS IN SITU CON CEMENTO**

En base a los resultados obtenidos, se realizan los cálculos de las secciones con firme reciclado con cemento, proponiendo un catálogo de secciones tipo para dos variaciones diferentes de calidad de explanada, en función de la categoría de tráfico pesado.

### **7.1. INTRODUCCIÓN**

El reciclado in situ del firme es una técnica de rehabilitación total y por tanto independiente de las deflexiones medidas antes de su aplicación. Como todas las capas del firme, está estructuralmente condicionada por la capacidad de soporte de la capa sobre la que se apoya, así como por las características del material antes y después de proceder a su reciclado, tales como el espesor y naturaleza de las capas a reciclar, el porcentaje de betún residual o el contenido y tipo de conglomerante empleado, pero de forma generalizada, en su dimensionamiento no interviene el nivel de deterioro previo de esta capa.

Los principales factores de diseño que intervienen en el proyecto de la sección son por tanto:

- la intensidad de tráfico pesado,
- la capacidad de soporte de la explanada,
- las características de los materiales y del producto reciclado obtenido,
- el periodo de proyecto.

Otros condicionantes constructivos, como la disponibilidad de equipos, el volumen de la obra o el clima, pueden influir en la elección o rechazo de la solución reciclado, pero no son significativos a la hora de diseñar la sección de firme reciclada.

Como periodo de proyecto o plazo durante el cual el firme permanece en buen estado de servicio sin necesidad de actuaciones de rehabilitación importantes se adopta 20 años, de acuerdo con lo que se establecía para firmes flexibles y semirrígidos en la anterior Norma 6.1 y 6.2-IC<sup>(19)</sup> y en muchos otros documentos de dimensionamiento<sup>(78)</sup>.

Por otro lado, también se consideran las prescripciones exigidas al material reciclado con cemento incluidas en el capítulo 21 del Pliego General PG-4 del Ministerio de Fomento, reciclado in situ con cemento de capas de firmes<sup>(6)</sup>, por lo que se utiliza con carácter general las características del material reciclado que se han investigado y estudiado en esta tesis.

## 7.2. EL TRÁFICO

La Norma 6.1-IC<sup>(1)</sup> clasifica el tráfico pesado en 6 categorías (de T00 a T4) subdividiendo las dos últimas en dos subcategorías, de acuerdo con la intensidad media diaria de vehículos pesados prevista para el carril de proyecto en el año de apertura al tráfico. Las Recomendaciones de Proyecto y Construcción de Firmes y Pavimentos<sup>(7)</sup> de la Junta de Castilla y León, incluso subdivide en otras dos la categoría T2, persiguiendo una mejor adecuación de los firmes proyectados a los rangos de tráfico de vehículos pesados, de acuerdo con la siguiente clasificación, que es la que se mantendrá en este estudio:

Tabla 153. Categorías de tráfico pesado

Categoría de tráfico	T00	T0	T1	T2		T3		T4	
Subcategoría	T00	T0	T1	T21	T22	T31	T32	T41	T42
IMD <sub>p</sub> <sup>(*)</sup>	> 4000	2000	800	400	200	100	50	25	0

(\*) Intensidad Media Diaria de vehículos pesados en el carril de proyecto y año de puesta en servicio.

Con estos valores límites que delimitan cada subcategoría, se calcula el tráfico equivalente de proyecto (TEP), es decir el número de ejes tipo de 13 toneladas que discurrirán por el carril de proyecto del firme a diseñar en cada categoría de tráfico pesado durante el periodo de proyecto. Aunque en el anejo IX, masas y dimensiones, del Reglamento General de Vehículos<sup>(79)</sup> se limita la masa por eje motor a 11,5 toneladas, se ha constatado por un lado que dicha reducción todavía no se cumple de forma eficaz en España, y por otro que en dicho Reglamento se permiten 13 y 12,6 t en el caso de ejes de vehículos de las clases I, II y III (autobuses) según la clasificación de la directiva 2001/85/CE de 20 de noviembre.

Por tanto, la carga tipo de cálculo a considerar representativa de los vehículos pesados, será la formada por un semieje simple con una carga de 13 toneladas con ruedas gemelas separadas 37,5 cm entre centros de rueda. Considerando que en dicho Reglamento General de Vehículos se limita la presión a 9 kg/cm<sup>2</sup>, se ha consultado a varias empresas de vehículos de transporte cual es la presión normal de inflado en el caso de vehículos pesados, resultando ser 8,5 kg/cm<sup>2</sup>, por lo que se adopta el valor de 0,9 MPa.

Considerando estos valores, el radio de huella de los neumáticos (o círculo sobre el que se transmite la carga al firme) tendrá un radio:

$$\sigma = \frac{P/4}{\pi \cdot R^2} \quad R = \sqrt{\frac{P/4}{\pi \cdot \sigma}} = \sqrt{\frac{32 \cdot 10^3}{\pi \cdot 900 \cdot 10^3}} = 0,1064 \text{ m} = 10,64 \text{ cm}$$

El tráfico equivalente de proyecto viene dado por<sup>(20)</sup>:

$$\text{TEP} = \text{IMD}_p \cdot \text{CE} \cdot 365 \cdot F \cdot \gamma_t$$

donde :

$IMD_p$  = Intensidad media diaria de vehículos pesados en el carril de proyecto en el año de apertura al tráfico.

$CE$  = Coeficiente de equivalencia medio de los vehículos pesados, es decir el número de veces de la carga tipo del eje simple de 13 toneladas considerado que produce el mismo efecto destructor sobre el firme que un vehículo pesado medio. Ante la imposibilidad de definirlo para cada carretera en función del tráfico aforado, se adopta el valor de 0,6 utilizado por el CEDEX para firmes semirrígidos en la Red de Carreteras del Estado y en algunos otros estudios<sup>(80)</sup>.

$F$  = Factor de crecimiento del tráfico de vehículos pesados que se traduce en la acumulación de tráfico pesado durante el periodo de proyecto (20 años en este caso). Considerando una tasa de crecimiento constante del 3%, razonable en la actualidad y quizás elevado a largo plazo por el escaso crecimiento de la intensidad de tráfico, viene expresada por:

$$F = \frac{(1 + 0,03)^{20} - 1}{0,03} = 26,870$$

$\gamma_t$  = Coeficiente de seguridad de mayoración de cargas que responde a la incertidumbre asociada al valor de las cargas de los vehículos pesados que circulan por la vía. Se adoptan los siguientes valores según la categoría de tráfico pesado, de acuerdo con los incluidos en la Instrucción para el diseño de firmes de las carreteras de Andalucía<sup>(20)</sup>:

Tabla 154. Coeficiente de mayoración de cargas

Categoría de tráfico pesado	T00 a T1	T2 y T3	T4
$\gamma_t$	1,20	1,10	1,00

Y aplicando los valores expuestos en cada caso, el tráfico equivalente de proyecto TEP que se considerará para cada subcategoría de tráfico pesado (número acumulado de ejes equivalentes que debe soportar el firme) será el siguiente:

Tabla 155. Tráfico equivalente de proyecto (número acumulado de ejes exigido)

Categoría de tráfico pesado	Subcategoría	IMD <sub>p</sub> de cálculo	Nº vehículos pesados	Numero ejes TEP
T00	T00	7.000	82.384.568	49.430.741
T0	T0	4.000	47.076.896	28.246.138
T1	T1	2.000	25.538.448	14.123.069
T2	T21	800	8.630.764	5.178.459
	T22	400	4.315.382	2.589.229
T3	T31	200	2.157.691	1.294.615
	T32	100	1.078.846	647.307
T4	T41	50	490.384	294.231
	T42	25	245.192	147.115

### 7.3. LA EXPLANADA

Una explanada de elevada capacidad de soporte significa una menor deformación bajo carga y menores tensiones y deformaciones del resto de las capas del firme, lo que se traduce en garantía de calidad del conjunto explanada – firme. Por ello, en las actuales normativas se suele apostar por las explanadas de la mayor calidad posible, valorando las soluciones con suelos estabilizados con cemento, algo menos deformables, más impermeables y con mejor comportamiento.

Pero en el caso que nos ocupa de secciones recicladas in situ, no se puede modificar las características de la explanada o capa de apoyo del firme, teniendo que aceptar la existente (salvo que se levante y se reponga todo el firme). Es usual, en el diseño de este tipo de firmes, considerar una explanada de categoría E3 de acuerdo con la clasificación establecida en la Norma 6.1-IC<sup>(1)</sup> del Ministerio de Fomento, debido a que tras tantos años de servicio que han llevado al agotamiento del firme, se puede considerar que los suelos situados bajo el firme están perfectamente compactados y su comportamiento es correcto.

Debido a que esto no siempre es cierto, se van a considerar dos situaciones distintas diferenciadas por los siguientes tipos de explanada (en todos los casos se considera la explanada un macizo semiinfinito de características y propiedades constantes):

Caso 1º.- La explanada está perfectamente compactada y es de calidad por lo que se considera explanada E3 con índice CBR superior o igual a 20. El módulo de elasticidad a considerar es 200 MPa y el coeficiente de Poisson considerado es 0,35 (aunque algunos autores utilizan coeficiente 0,35 o 0,40 para suelos naturales, se adoptan las recomendaciones de la Instrucción andaluza<sup>(20)</sup> y la Guía francesa<sup>(76)</sup>).

Caso 2º.- La explanada o los suelos subyacentes tienen cierta plasticidad y no se puede asegurar su calidad por lo que se considerará una explanada de categoría E1 con

índice CBR superior o igual a 5. El módulo de elasticidad es 50 MPa y el coeficiente de Poisson adoptado es 0,35.

En ambos casos, considerando que la Norma 6.1-IC<sup>(1)</sup> no especifica ninguna ley de fatiga para la explanada, se utiliza la ley de Brown y Pell que es de empleo generalizado para el caso de suelos granulares y explanadas, y viene definida por la expresión:

$$\varepsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$$

donde  $\varepsilon_z$  es la deformación unitaria vertical en compresión y N el número de aplicaciones de la carga tipo.

#### **7.4. CAPAS BITUMINOSAS DE RODADURA**

Las mezclas bituminosas tienen un módulo de deformación que varía según sus características, el tipo de mezcla y la época climática, por el comportamiento termosensible del betún.

Las características mecánicas que proporciona el CEDEX están referidas a una temperatura de ensayo estándar de 20°C y ensayadas con una frecuencia de carga de 10 Hz que corresponde al rango inferior de las velocidades habituales con que circulan los vehículos pesados (50-70 km/h) por lo que supone una solución del lado de la seguridad. En los datos publicados en el Manual de firmes con capas tratadas con cemento<sup>(18)</sup> del CEDEX e IECA se consideran las siguientes características mecánicas para las capas de mezcla bituminosa: módulo de deformación de 7.000 MPa para mezclas densas y semidensas y 5.000 MPa en capas gruesas y coeficiente de Poisson 0,33.

El valor del módulo se ve modificado en los datos publicados en la Instrucción para el diseño de firmes de la red de Carreteras de Andalucía<sup>(20)</sup>, así como en varias otras publicaciones<sup>(78)</sup>, adoptándose un módulo general de 6.000 MPa, que será el considerado en los cálculos.

No obstante, para el caso de las categorías de tráfico más pesado (superior o igual a T1) se considera una rodadura discontinua que es lo usual para asegurar ciertas cualidades de confort y seguridad con lluvia, adoptándose un módulo de 4.000 MPa y 0,35 de coeficiente Poisson.

Las mezclas bituminosas tienen como parámetro crítico la deformación unitaria horizontal por tracción ( $\epsilon_r$ ), que se produce en la parte inferior de la capa bituminosa en contacto con la capa reciclada. La ley de fatiga empleada en el cálculo es la publicada por el Ministerio de Fomento en la Norma 6.1-IC<sup>(1)</sup>, adoptada por la mayoría de las normas regionales:

$$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$$

## **7.5. MODELOS DE RESPUESTA**

De acuerdo con lo expuesto en el primer capítulo de este trabajo, el dimensionamiento analítico del firme se basa en una modelización del firme en el que se generan:

- 1º.- Modelos matemáticos de respuesta que reproduce el comportamiento estructural real del firme bajo la carga.
- 2º.- Modelos de comportamiento basados en los ensayos de laboratorio que relacionan los resultados obtenidos (tensiones y deformaciones) con la evolución en servicio del firme.

De todos los modelos de respuesta posibles se va a utilizar el de uso más generalizado, el modelo elástico multicapa desarrollado por Burmister<sup>(81)</sup> en 1943 de acuerdo a las siguientes hipótesis:

- El firme se modeliza con varias capas horizontales indefinidas paralelas de espesor constante, asentadas sobre un espacio semiinfinito de Boussinesq. (desarrollado en 1885).
- Cada capa y el terreno natural se suponen un medio elástico lineal, homogéneo, isótropo y continuo caracterizado por su módulo de deformación y su coeficiente de Poisson.
- Existe un apoyo continuo entre capas contiguas, considerándose perfectamente adheridas para este caso.
- No se considera el efecto de los gradientes térmicos.
- Se adopta la hipótesis de pequeñas deformaciones en el conjunto del firme, es decir los desplazamientos del sistema son pequeños.
- Se considera una carga homogénea aplicada verticalmente, distribuida uniformemente sobre un círculo en la superficie de pavimento, despreciándose los esfuerzos de corte y los debidos a tramos curvos o frenadas, lo que permite establecer una simetría axial y trabajar en coordenadas cilíndricas.

El planteamiento matemático está dirigido a la resolución de una ecuación diferencial en derivadas parciales, buscando las funciones de Love que resuelvan el bilaplaciano igual a cero, verificando las condiciones de contorno que representa el problema de la estructura de

firme analizada. La resolución mediante transformadas conduce a unas integrales que no admiten una solución explícita y que requieren un tratamiento numérico.

Para ello se utilizará un programa de cálculo analítico, en el que se definen las capas que integran el firme, sus espesores y parámetros característicos de cada material.

Mediante dicho programa informático se obtienen los parámetros críticos que produce la carga tipo, definidos por las deformaciones y tensiones radiales y verticales en cada una de las capas del firme.

Con las leyes de fatiga se obtienen el número de aplicaciones de carga tipo que es capaz de soportar cada capa del firme, y el menor de los valores obtenidos en el cálculo será el número de aplicaciones de carga que la sección aguanta estructuralmente.

Si dicho valor supera el tráfico equivalente de proyecto correspondiente a la categoría de tráfico pesado con cierto margen de seguridad, la sección diseñada y en estudio se da por buena. En caso contrario se incrementa el espesor de las capas de mezcla bituminosa o de la capa reciclada hasta obtener una solución válida.

**7.6. CÁLCULO DE SECCIONES RECICLADAS CON EXPLANADA DE BUENA CALIDAD**

Con las características establecidas para cada firme formado por una o varias capas de mezcla bituminosa, el material reciclado y una explanada de calidad contrastada y perfectamente compactada, se obtienen las tensiones y deformaciones radiales o tangenciales y verticales de cada capa. Los espesores de partida de cada sección, según la categoría de tráfico pesado, son los siguientes:

Tabla 156. Secciones de firme reciclado de partida con explanada de buena calidad

SECCIONES DE FIRME RECICLADO (espesores mínimos en cm)														
Categoría de tráfico pesado	T00	T0	T1		T21		T22	T31		T32	T41		T42	
			a	b	a	b		a	b		a	b	a	b
Mezcla bituminosa	20	18	16	18	12	14	12	10	12	10	8	8	5	5
Capa reciclada in situ con cemento	35	35	35	30	35	30	30	30	25	25	25	22	25	20

Nota: a/b indica dos posibles alternativas

Para determinar la distribución y espesores de las capas de mezcla bituminosa se han considerado las indicaciones incluidas en la Norma 6.1-IC<sup>(1)</sup> y en los capítulos 542 y 543 del Pliego General PG-3<sup>(82)</sup> del Ministerio de Fomento. Así se han definido las siguientes directrices:

- Se dispone de una rodadura discontinua tipo BBTM de 3 cm de espesor en las categorías de tráfico pesado superiores o igual a T1 para lograr unas características funcionales de altas prestaciones (confort y seguridad en época de lluvia). En el resto de las categorías de tráfico se considera una rodadura del tipo AC (mezclas tipo S o D), que es lo más común. Así se dispone una rodadura AC 16 surf S cuando el espesor de la capa superior es de 4 o 5 cm y del tipo AC 22 surf S cuando es de 6 cm.
- No se consideran espesores de mezcla bituminosa inferiores a 12 cm para tráfico de categoría pesada T2, ni inferior a 10 cm para tráfico T3, ni a 8 cm para categoría T41, con el fin de asegurar una regularidad superficial y confort acordes con la intensidad y la categoría del tráfico circulante.
- Se dispone de mezclas tipo AC 22 bin S y AC 32 bin S en capa intermedia (que podrían sustituirse por tipo AC 22 bin D sin ningún inconveniente estructural) y del tipo AC 32 base S en la capa inferior. Aunque en algunas zonas de España se emplean capas de base del tipo AC 32 base G por resultar más económicas, no se considera apropiado su empleo en este tipo de firmes (ni sobre ninguna capa de material tratado con cemento) por ser mezclas de menor contenido en betún y peor comportamiento a la fatiga<sup>(83)</sup>.

Las mezclas bituminosas y espesores empleados son:

Tabla 157. Espesores y tipos de mezclas bituminosas consideradas en el cálculo

Categoría tráfico pesado	Espesor MB	Rodadura	Intermedia	Base
T00	20	3 cm BBTM	8 cm AC 22 bin S	9 cm AC 32 base S
T0	18	3 cm BBTM	6 cm AC 22 bin S	9 cm AC 32 base S
T1	16	3 cm BBTM	5 cm AC 22 bin S	8 cm AC 32 base S
T21b	14	6 cm AC 22 surf S	8 cm AC 22 bin S	--
T21a / T22 / T31b	12	6 cm AC 22 surf S	6 cm AC 22 bin S	--
T31a / T32	10	5 cm AC 16 surf S	5 cm AC 22 bin S	--
T41	8	4 cm AC 16 surf S	4 cm AC 16 bin S	--
T42	5	5 cm AC 16 surf S	--	--

En el cálculo analítico de cada sección, se han empleado los módulos de deformación y coeficientes de Poisson correspondientes a cada una de estas mezclas en función de su tipo y espesor.

Los resultados obtenidos se incluyen en el anejo 3 procediéndose a calcular el número de ejes tipo que cada sección puede soportar de acuerdo con las leyes de fatiga establecidas. Para el caso de capa de firme reciclado con cemento se emplea la ley de fatiga obtenida en el laboratorio y establecida en el capítulo 6 anterior. Se recuerda a continuación las características mecánicas y leyes de fatiga de cada capa:

Tabla 158. Características de los materiales de cada capa

		E(MPa)	$\nu$	Ley de fatiga
Mezclas bituminosas		6.000	0,33	$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$
Capa rodadura discontinua		4.000	0,35	
Capa reciclada con cemento		5.000	0,25	$\sigma = 6,93 (1 - 0,058 \log N)$
Explanada	E3	200	0,35	$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$
	E1	60		

Los parámetros críticos de cálculo que corresponden a las deformaciones tangenciales de la inferior de las capas bituminosas, las tensiones tangenciales de las capas recicladas y los valores de deformación vertical de la explanada obtenidos en cada sección son los siguientes:

Tabla 159. Tensiones y deformaciones críticas obtenidas del cálculo para cada sección

Categoría de tráfico pesado	Mezcla bituminosa $\epsilon_r (10^{-6})$	Capa de reciclado $\sigma_r (kg/cm^2)$	Explanada $\epsilon_z (10^{-6})$	Capa estructural posible fallo
T00	-16,60	-2,087	80,60	Explanada
T0	-18,40	-2,224	85,90	Explanada
T1a	-20,50	-2,373	91,80	Explanada
T1b	-18,40	-2,607	100,90	Explanada
T21a	-21,00	-2,415	104,20	Explanada
T21b	-19,70	-2,677	115,30	Explanada
T22	-20,70	-2,879	124,10	Explanada
T31a	-20,30	-3,104	133,90	Explanada
T31b	-20,60	-3,482	149,80	Explanada
T32	-19,80	-3,773	162,60	Explanada
T41a	-15,70	-4,100	177,10	Reciclado
T41b	-15,10	-4,661	202,20	Reciclado
T42a	-32,20	-4,680	203,90	Reciclado
T42b	-37,70	-5,996	269,40	Reciclado

Conviene destacar que en las vías de baja intensidad de tráfico, el fallo estructural suele provocarse principalmente por las sobrecargas que soportan más que a la acumulación de cargas, debido al escaso volumen de tráfico que circula. Es por esto por lo que el cálculo analítico basado en unas leyes de fatiga que dan respuesta al agotamiento estructural de una sección por repetición de cargas hasta la fatiga no resulta de aplicación, y los diseños de estos firmes utilizados para las subcategorías de tráfico T41 y T42 (especialmente en esta última) suelen basarse en la experiencia o comportamiento de los ya construidos en la zona.

Por lo tanto, se debe considerar con cierta perspectiva, la tensión que soporta la capa de material reciclado con cemento en el caso de estas subcategorías de tráfico pesado, que podrían parecer excesivas.

El número de ejes mínimo que soporta cada una de las secciones diseñadas resulta del cálculo, en comparación con el tráfico equivalente de proyecto (TEP) exigido, el siguiente (cálculos incluidos en el anejo 3):

Tabla 160. Número de ejes soportado por cada sección

Categoría de tráfico pesado	Espesores (cm) MB + Reciclado	Capa estructural posible fallo	Numero ejes exigido TEP	Número mínimo resultado calculo
T00	20+35	Explanada	49.430.741	469.734.581
T0	18+35	Explanada	28.246.138	374.173.931
T1a	16+35	Explanada	14.123.069	295.147.790
T1b	18+30	Explanada		210.590.028
T21a	12+35	Explanada	5.178.459	187.724.754
T21b	14+30	Explanada		130.772.333
T22	12+30	Explanada	2.589.229	100.562.395
T31a	10+30	Explanada	1.294.615	76.656.158
T31b	12+25	Explanada		51.346.036
T32	10+25	Explanada	647.307	38.311.830
T41a	8+25	Reciclado	294.231	10.986.310
T41b	8+22	Reciclado		441.694
T42a	5+25	Reciclado	147.115	396.142
T42b	5+20	Reciclado		211

Nota: a/b indica dos posibles alternativas

De los cálculos realizados y resumidos en la tabla anterior se deduce que las soluciones subdenominadas “a” donde se plantean dos alternativas, resultan mejores estructuralmente, además de resultar más económicas. Por todo ello, se considerarán las secciones correspondientes a las categorías de tráfico denominadas T00 / T0 / T1a / T21a / T22 / T31a / T32 / T41a y T42a.

Aunque además de estas, se han calculado muchas otras soluciones al ir tanteando diferentes espesores de mezclas bituminosas que se han ido modificando de centímetro en centímetro para analizar las tensiones y deformaciones obtenidas en cada capa de cada sección, se omiten aquí dichos cálculos reduciéndose la exposición a las secciones tipo reflejadas en la tabla 156, en las que se han optimizados los espesores de cada capa. En todos los casos se ha buscado también cierto equilibrio en el aspecto económico.

Además, con el objeto de mantener cierto confort y disponer de una regularidad superficial acorde con los requisitos de seguridad vial, se han mantenido los espesores mínimos de capa bituminosa indicados. Así, no se han considerado otras soluciones como 5 cm de mezcla bituminosa sobre 30 cm de capa reciclada en el caso de subcategoría de tráfico T41, pues aunque pudiera resultar una sección con mayor capacidad estructural, no aseguraría la regularidad superficial necesaria al extenderse sobre el reciclado una única capa de mezcla bituminosa.

### 7.7. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LAS SECCIONES A LA CALIDAD DE LA EXPLANADA

Hay algunos factores que resultan de importancia vital para asegurar la vida útil de este tipo de firmes reciclados con cemento, así como de cualquier sección diseñada con suelocemento o gravacemento, como puede ser asegurar la adherencia total de las diferentes capas o cumplir constructivamente con los espesores y las resistencias mínimas exigidas en las capas recicladas.

Otro tipo de factores puede influir análogamente en acortar la vida útil del firme pero sin una importancia tan decisiva. Entre estos se pueden citar el tipo de mezclas bituminosas empleadas, el contenido en betún de las mismas (sobre todo en la capa dispuesta inmediatamente encima de la capa reciclada), la agresión climática y los cambios térmicos, u otros similares.

Considerando que los primeros se cumplirán adecuadamente durante la realización del reciclado y la construcción del firme, se va a analizar la sensibilidad de la sección ante la reducción de calidad de uno de los factores sobre el que se tiene menor capacidad de actuación: la capacidad de soporte de la explanada o el suelo sobre la que se apoya la capa reciclada del firme.

Así se ha supuesto en todas las secciones de firme que la explanada tiene una calidad inferior a la prevista, que se traduce en el cálculo con un menor módulo de deformación, adoptándose el valor de 120 MPa en lugar de 200 MPa. En este caso los parámetros críticos de cada capa, que vienen dados por las deformaciones tangenciales en las mezclas bituminosas y verticales en la explanada y las tensiones tangenciales en la capa reciclada de acuerdo con los cálculos incluidos en el anejo 3, son las siguientes:

Tabla 161. Tensiones y deformaciones al variar la calidad de la explanada

Categoría de tráfico pesado	Mezcla bituminosa $\varepsilon_r$ ( $10^{-6}$ )	Capa de reciclado $\sigma_r$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Explanada $\varepsilon_z$ ( $10^{-6}$ )	Capa estructural posible fallo
T00	-16,00	-2,396	95,30	Explanada
T0	-17,90	-2,557	101,80	Explanada
T1	-19,90	-2,731	108,90	Explanada
T21	-20,10	-2,783	124,40	Explanada
T22	-19,80	-3,332	149,00	Explanada
T31	-19,00	-3,600	161,30	Explanada
T32	-18,40	-4,403	197,70	Reciclado
T41	-13,80	-4,801	216,30	Reciclado
T42	38,40	-5,515	250,20	Reciclado

Y el número de ejes que soporta cada sección diseñada en el caso de un descenso de calidad en la explanada en comparación con el tráfico equivalente de proyecto (TEP) exigido, es el siguiente:

Tabla 162. Número de ejes soportado al variar la calidad de la explanada

Categoría de tráfico pesado	Capa estructural posible fallo	Numero ejes exigido TEP	Número mínimo resultado calculo
T00	Explanada	49.430.741	258.227.825
T0	Explanada	28.246.138	204.015.982
T1	Explanada	14.123.069	160.358.652
T21	Explanada	5.178.459	99.698.956
T22	Explanada	2.589.229	52.337.435
T31	Explanada	1.294.615	39.426.072
T32	Reciclado	647.307	1.936.458
T41	Reciclado	294.231	198.066
T42	Reciclado	147.115	3.315

Comprobándose que las secciones están correctamente diseñadas y que es factible un descenso en la capacidad de soporte de la explanada o de las capas situadas inmediatamente debajo de la capa reciclada. Además se confirma lo ya mencionado respecto a los tráficos T41 y T42 en los que no resulta de aplicación el cálculo analítico puro basado en el agotamiento estructural por repetición de cargas hasta la fatiga.

Se considera pues adecuadas las siguientes secciones de reciclado del firme con cemento:

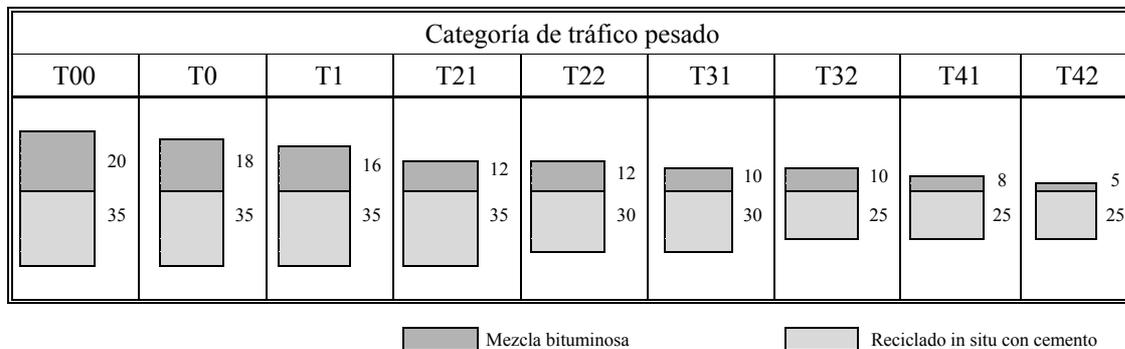


Figura 142. Secciones de firme reciclado con cemento sobre explanada de calidad contrastada

Se incluye a continuación de forma resumida las características y resultados del cálculo analítico de cada una de las secciones de firme reciclado propuestas, cuyos cálculos se incluyen en el anexo nº 3:

**Sección tráfico T00**

Espesores: 3 cm BBTM + 8 cm AC 22 bin S + 9 cm AC 32 base S  
+ 35 cm capa reciclada

Tensión tangencial capa reciclada:  $\sigma_r = - 0,209 \text{ MPa}$

Capa donde se localiza el fallo y parámetro crítico:

Explanada  $\varepsilon_z = 80,60 \cdot 10^{-6}$

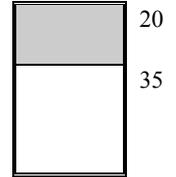
Capa donde se localiza el fallo si se reduce la calidad de la explanada:

Explanada  $\varepsilon_z = 95,30 \cdot 10^{-6}$

Número de aplicaciones de carga tipo que puede soportar:  $469,7 \cdot 10^6$

TEP (Número de aplicaciones exigidas):  $49,4 \cdot 10^6$

Vida de servicio teórica esperada: 73 años (proyectado para 20 años)



**Sección tráfico T0**

Espesores: 3 cm BBTM + 6 cm AC 22 bin S + 9 cm AC 32 base S  
+ 35 cm capa reciclada

Tensión tangencial capa reciclada:  $\sigma_r = - 0,222 \text{ MPa}$

Capa donde se localiza el fallo y parámetro crítico:

Explanada  $\varepsilon_z = 85,90 \cdot 10^{-6}$

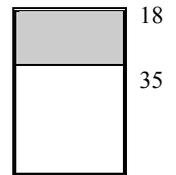
Capa donde se localiza el fallo si se reduce la calidad de la explanada:

Explanada  $\varepsilon_z = 101,80 \cdot 10^{-6}$

Número de aplicaciones de carga tipo que puede soportar:  $374,2 \cdot 10^6$

TEP (Número de aplicaciones exigidas):  $28,2 \cdot 10^6$

Vida de servicio teórica esperada: 83 años (proyectado para 20 años)



**Sección tráfico T1**

Espesores: 3 cm BBTM + 5 cm AC 22 bin S + 8 cm AC 32 base S  
+ 35 cm capa reciclada

Tensión tangencial capa reciclada:  $\sigma_r = - 0,237 \text{ MPa}$

Capa donde se localiza el fallo y parámetro crítico:

Explanada  $\varepsilon_z = 91,80 \cdot 10^{-6}$

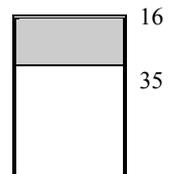
Capa donde se localiza el fallo si se reduce la calidad de la explanada:

Explanada  $\varepsilon_z = 108,90 \cdot 10^{-6}$

Número de aplicaciones de carga tipo que puede soportar:  $295,1 \cdot 10^6$

TEP (Número de aplicaciones exigidas):  $14,1 \cdot 10^6$

Vida de servicio teórica esperada: 97 años (proyectado para 20 años)



### Sección tráfico T21

Espesores: 6 cm AC 22 surf S + 6 cm AC 22 bin S  
+ 35 cm capa reciclada

Tensión tangencial capa reciclada:  $\sigma_r = -0,242 \text{ MPa}$

Capa donde se localiza el fallo y parámetro crítico:

Explanada  $\epsilon_z = 104,20 \cdot 10^{-6}$

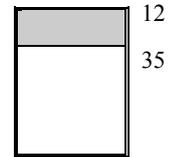
Capa donde se localiza el fallo si se reduce la calidad de la explanada:

Explanada  $\epsilon_z = 124,40 \cdot 10^{-6}$

Número de aplicaciones de carga tipo que puede soportar:  $187,07 \cdot 10^6$

TEP (Número de aplicaciones exigidas):  $5,2 \cdot 10^6$

Vida de servicio teórica esperada: 115 años (proyectado para 20 años)



### Sección tráfico T22

Espesores: 6 cm AC 22 surf S + 6 cm AC 22 bin S  
+ 30 cm capa reciclada

Tensión tangencial capa reciclada:  $\sigma_r = -0,288 \text{ MPa}$

Capa donde se localiza el fallo y parámetro crítico:

Explanada  $\epsilon_z = 124,10 \cdot 10^{-6}$

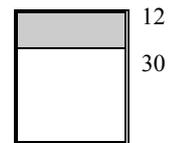
Capa donde se localiza el fallo si se reduce la calidad de la explanada:

Explanada  $\epsilon_z = 149,00 \cdot 10^{-6}$

Número de aplicaciones de carga tipo que puede soportar:  $100,6 \cdot 10^6$

TEP (Número de aplicaciones exigidas):  $2,6 \cdot 10^6$

Vida de servicio teórica esperada: 118 años (proyectado para 20 años)



### Sección tráfico T31

Espesores: 5 cm AC 22 surf S + 5 cm AC 22 bin S  
+ 30 cm capa reciclada

Tensión tangencial capa reciclada:  $\sigma_r = -0,310 \text{ MPa}$

Capa donde se localiza el fallo y parámetro crítico:

Explanada  $\epsilon_z = 133,90 \cdot 10^{-6}$

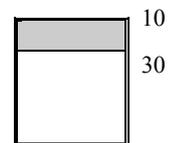
Capa donde se localiza el fallo si se reduce la calidad de la explanada:

Explanada  $\epsilon_z = 161,30 \cdot 10^{-6}$

Número de aplicaciones de carga tipo que puede soportar:  $76,7 \cdot 10^6$

TEP (Número de aplicaciones exigidas):  $1,3 \cdot 10^6$

Vida de servicio teórica esperada: 131 años (proyectado para 20 años)



**Sección tráfico T32**

Espesores: 5 cm AC 16 surf S + 5 cm AC 22 bin S  
+ 25 cm capa reciclada

Tensión tangencial capa reciclada:  $\sigma_r = - 0,377 \text{ MPa}$

Capa donde se localiza el fallo y parámetro crítico:

Explanada  $\varepsilon_z = 162,60 \cdot 10^{-6}$

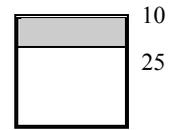
Capa donde se localiza el fallo si se reduce la calidad de la explanada:

Reciclado  $\sigma_r = - 0,440 \text{ MPa}$

Número de aplicaciones de carga tipo que puede soportar:  $38,3 \cdot 10^6$

TEP (Número de aplicaciones exigidas):  $0,65 \cdot 10^6$

Vida de servicio teórica esperada: 131 años (proyectado para 20 años)



**Sección tráfico T41**

Espesores: 4 cm AC 16 surf S + 4 cm AC 16 bin S  
+ 25 cm capa reciclada

Tensión tangencial capa reciclada:  $\sigma_r = - 0,410 \text{ MPa}$

Capa donde se localiza el fallo y parámetro crítico:

Reciclado (fatiga por tracciones repetidas en esta capa)

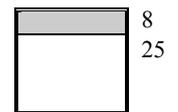
Capa donde se localiza el fallo si se reduce la calidad de la explanada:

Reciclado  $\sigma_r = - 0,480 \text{ MPa}$

Número de aplicaciones de carga tipo que puede soportar:  $11,0 \cdot 10^6$

TEP (Número de aplicaciones exigidas):  $0,29 \cdot 10^6$

Vida de servicio teórica esperada: 116 años



**Sección tráfico T42**

Espesores: 5 cm AC 16 surf S + 25 cm capa reciclada

Tensión tangencial capa reciclada:  $\sigma_r = - 0,468 \text{ MPa}$

Capa donde se localiza el fallo y parámetro crítico:

Reciclado

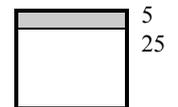
Capa donde se localiza el fallo si se reduce la calidad de la explanada:

Reciclado  $\sigma_r = - 0,551 \text{ MPa}$

Número de aplicaciones de carga tipo que puede soportar:  $0,40 \cdot 10^6$

TEP (Número de aplicaciones exigidas):  $0,15 \cdot 10^6$

Vida de servicio teórica esperada: 39 años



## 7.8. CÁLCULO DE SECCIONES RECICLADAS CON EXPLANADA DE BAJA CALIDAD

En el caso de disponer de una explanada o suelos de apoyo con algo de plasticidad o con problemas de capacidad de soporte en los que no esté asegurada cierta calidad, se proponen y estudian los siguientes incrementos de espesores en las secciones de firme reciclado:

Tabla 163. Secciones de firme reciclado con explanada de baja calidad

SECCIONES DE FIRME RECICLADO (espesores mínimos en cm)									
Categoría de tráfico pesado	T00	T0	T1	T21	T22	T31	T32	T41	T42
Mezcla bituminosa	-	-	20	15	12	10	10	8	5
Capa reciclada in situ con cemento	-	-	35	35	35	35	30	30	30

Como puede apreciarse, no se considera la opción de explanada de baja calidad con las categorías de tráfico pesado T0 y T00, pues es una situación que resulta difícil que se produzca en la realidad, y en caso de suceder, se considera que lo más apropiado es sanear la explanada (retirando previamente el firme) o considerar la propia carretera como capa de apoyo del nuevo firme. Incluso en el caso de categoría de tráfico T1, se ha tenido que diseñar un espesor de capas de mezclas bituminosas considerable ante la limitación técnica de reciclar y compactar adecuadamente más de 35 cm de espesor o profundidad.

Otra alternativa que no se contempla en esta propuesta sería mantener los espesores pero incrementar la resistencia a compresión exigida en el material reciclado a la edad de 7 días, por ejemplo a 3,5 MPa, con lo que se obtendría un material de mayor módulo y mayor capacidad estructural que 'podría lograr una sección de suficiente capacidad de soporte para el tráfico a soportar.

Respecto a las mezclas bituminosas, se mantienen las consideraciones realizadas sobre espesores y tipos de las diferentes capas, siendo en este caso las siguientes:

Tabla 164. Espesores y tipos de mezclas bituminosas consideradas en el cálculo

Categoría tráfico pesado	Espesor MB	Rodadura	Intermedia	Base
T1	20	3 cm BBTM	8 cm AC 22 bin S	9 cm AC 32 base S
T21	15	6 cm AC 22 surf S	9 cm AC 22 bin S	--
T22	12	6 cm AC 22 surf S	6 cm AC 22 bin S	--
T31 / T32	10	5 cm AC 16 surf S	5 cm AC 22 bin S	--
T41	8	4 cm AC 16 surf S	4 cm AC 16 bin S	--
T42	5	5 cm AC 16 surf S	--	--

Los resultados obtenidos se incluyen en el anejo 3 procediéndose a calcular el número de ejes tipo que cada sección puede soportar de acuerdo con las leyes de fatiga establecidas.

Los parámetros críticos de cálculo obtenidos en cada sección, que corresponden a las deformaciones tangenciales de la fibra inferior de las capas bituminosas, las tensiones tangenciales de las capas recicladas y los valores de deformación vertical de la explanada, son los siguientes:

Tabla 165. Tensiones y deformaciones críticas obtenidas del cálculo para cada sección

Categoría de tráfico pesado	Mezcla bituminosa $\epsilon_r (10^{-6})$	Capa de reciclado $\sigma_r (kg/cm^2)$	Explanada $\epsilon_z (10^{-6})$	Capa estructural posible fallo
T1	-17,70	-2,889	124,00	Explanada
T21	-17,30	-3,034	146,90	Explanada
T22	-18,60	-3,375	164,00	Explanada
T31	-17,80	-3,634	177,00	Explanada
T32	-16,90	-4,404	215,40	Reciclado
T41	-12,40	-4,790	235,20	Reciclado
T42	41,20	-5,481	271,30	Reciclado

El número de ejes mínimo que soporta cada una de las secciones diseñadas resulta de acuerdo con los cálculos incluidos en el anejo 3, en comparación con el tráfico equivalente de proyecto (TEP) exigido, el siguiente:

Tabla 166. Número de ejes soportado por cada sección

Categoría de tráfico pesado	Capa estructural posible fallo	Numero ejes exigido TEP	Número mínimo resultado calculo
T1	Explanada	14.123.069	100.852.333
T21	Explanada	5.178.459	55.059.012
T22	Explanada	2.589.229	37.156.549
T31	Explanada	1.294.615	28.295.412
T32	Reciclado	647.307	1.925.396
T41	Reciclado	294.231	210.949
T42	Reciclado	147.115	4.027

Comprobándose que las secciones están correctamente diseñadas y confirmándose de nuevo lo ya comentado sobre los tráficos T41 y T42 de baja intensidad.

Se considera por tanto correctas las siguientes secciones recicladas con cemento en el caso de explanadas de baja calidad:

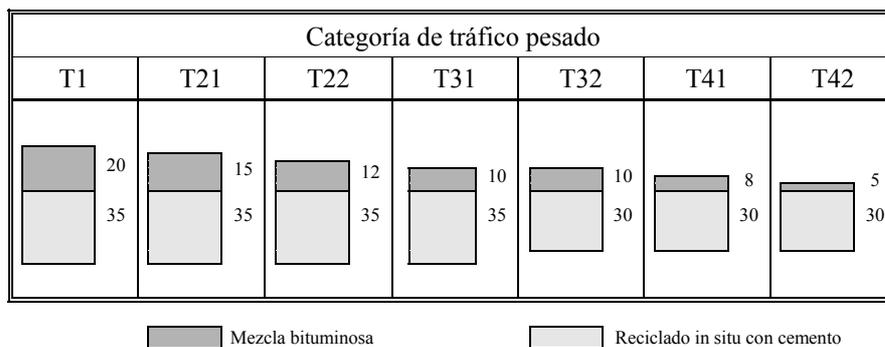


Figura 143. Secciones de firme reciclado con cemento sobre explanada de baja calidad

A continuación se incluyen las características y resultados del cálculo analítico de las secciones recicladas cuando se apoyan sobre una explanada de dudosa calidad:

### Sección tráfico T1

Espesores: 3 cm BBTM + 8 cm AC 22 bin S + 9 cm AC 32 base S  
+ 35 cm capa reciclada

Tensión tangencial capa reciclada:  $\sigma_r = -0,289 \text{ MPa}$

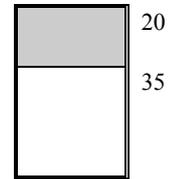
Capa donde se localiza el fallo y parámetro crítico:

Explanada  $\epsilon_z = 124,00 \cdot 10^{-6}$

Número de aplicaciones de carga tipo que puede soportar:  $100,8 \cdot 10^6$

TEP (Número de aplicaciones exigidas):  $14,1 \cdot 10^6$

Vida de servicio teórica esperada: 64 años (proyectado para 20 años)



### Sección tráfico T21

Espesores: 6 cm AC 22 surf S + 9 cm AC 22 bin S  
+ 35 cm capa reciclada

Tensión tangencial capa reciclada:  $\sigma_r = -0,303 \text{ MPa}$

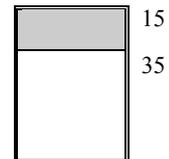
Capa donde se localiza el fallo y parámetro crítico:

Explanada  $\epsilon_z = 146,90 \cdot 10^{-6}$

Número de aplicaciones de carga tipo que puede soportar:  $55,1 \cdot 10^6$

TEP (Número de aplicaciones exigidas):  $5,2 \cdot 10^6$

Vida de servicio teórica esperada: 76 años (proyectado para 20 años)



### Sección tráfico T22

Espesores: 6 cm AC 22 surf S + 6 cm AC 22 bin S  
+ 35 cm capa reciclada

Tensión tangencial capa reciclada:  $\sigma_r = -0,337 \text{ MPa}$

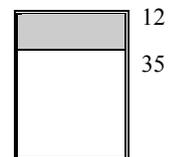
Capa donde se localiza el fallo y parámetro crítico:

Explanada  $\epsilon_z = 164,00 \cdot 10^{-6}$

Número de aplicaciones de carga tipo que puede soportar:  $37,2 \cdot 10^6$

TEP (Número de aplicaciones exigidas):  $2,6 \cdot 10^6$

Vida de servicio teórica esperada: 86 años (proyectado para 20 años)



### Sección tráfico T31

Espesores: 5 cm AC 22 surf S + 5 cm AC 22 bin S  
+ 35 cm capa reciclada

Tensión tangencial capa reciclada:  $\sigma_r = -0,363 \text{ MPa}$

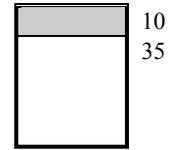
Capa donde se localiza el fallo y parámetro crítico:

Explanada  $\varepsilon_z = 177,00 \cdot 10^{-6}$

Número de aplicaciones de carga tipo que puede soportar:  $28,3 \cdot 10^6$

TEP (Número de aplicaciones exigidas):  $1,3 \cdot 10^6$

Vida de servicio teórica esperada: 99 años (proyectado para 20 años)



### Sección tráfico T32

Espesores: 5 cm AC 16 surf S + 5 cm AC 22 bin S  
+ 30 cm capa reciclada

Tensión tangencial capa reciclada:  $\sigma_r = -0,440 \text{ MPa}$

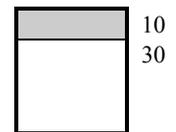
Capa donde se localiza el fallo y parámetro crítico:

Reciclado (fatiga por tracciones repetidas en esta capa)

Número de aplicaciones de carga tipo que puede soportar:  $1,93 \cdot 10^6$

TEP (Número de aplicaciones exigidas):  $0,65 \cdot 10^6$

Vida de servicio teórica esperada: 41 años (proyectado para 20 años)



### Sección tráfico T41

Espesores: 4 cm AC 16 surf S + 4 cm AC 16 bin S  
+ 30 cm capa reciclada

Tensión tangencial capa reciclada:  $\sigma_r = -0,479 \text{ MPa}$

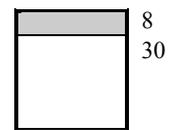
Capa donde se localiza el fallo y parámetro crítico:

Reciclado (fatiga por tracciones repetidas en esta capa)

Número de aplicaciones de carga tipo que puede soportar:  $0,21 \cdot 10^6$

TEP (Número de aplicaciones exigidas):  $0,29 \cdot 10^6$

Vida de servicio teórica esperada: 15 años. Solución diseñada en base a la experiencia



### **Sección tráfico T42**

Espesores: 5 cm AC 16 surf S + 30 cm capa reciclada

Tensión tangencial capa reciclada:  $\sigma_r = -0,546 \text{ MPa}$

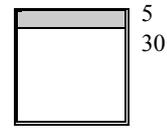
Capa donde se localiza el fallo y parámetro crítico:

Reciclado

Número de aplicaciones de carga tipo que puede soportar:  $0,04 \cdot 10^6$

TEP (Número de aplicaciones exigidas):  $0,15 \cdot 10^6$

Vida de servicio teórica esperada: Solución diseñada en base a la experiencia



### **7.9. PROPUESTA DE UN CATÁLOGO DE SECCIONES DE FIRME RECICLADO CON CEMENTO**

Se han realizado los cálculos estructurales de las secciones propuestas de firme reciclado in situ con cemento, en base a la ley de fatiga obtenida en el laboratorio para el material reciclado, que viene definida por la expresión:

$$\frac{\sigma}{R_f} = 1 - 0,058 \cdot \log N$$

Y en base a todo ello, se consideran adecuadas las secciones diseñadas, que resultan equilibradas tanto desde el punto de vista estructural, como económico, ya que suponen una solución de reducido coste que permite restituir la capacidad de soporte de cualquier carretera fatigada de una forma más lógica y más económica que otras opciones como los refuerzos con mezcla bituminosa o la construcción de nuevas secciones de firme sobre la carretera. Se proponen pues las siguientes secciones de firme reciclado in situ con cemento según la calidad de la explanada:

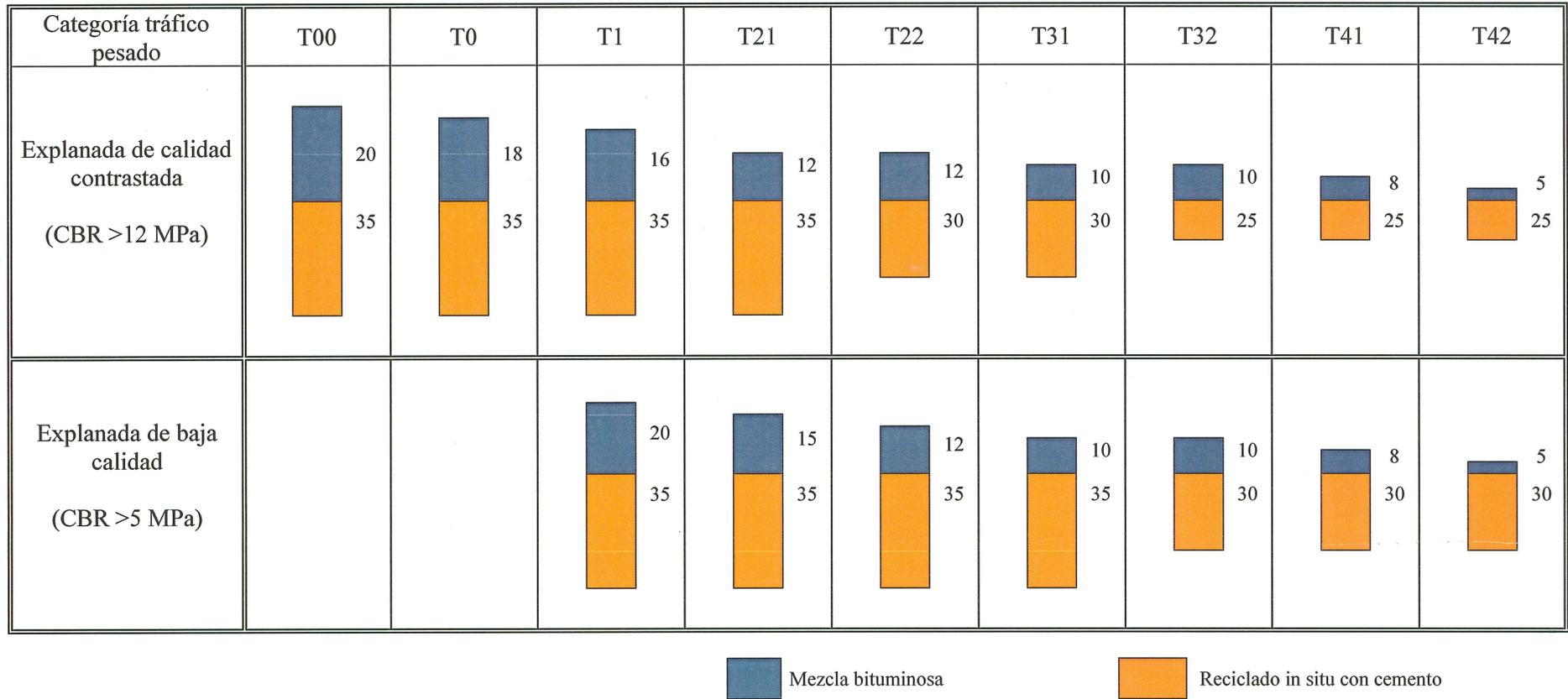


Figura 144. Catálogo de secciones de firme reciclado con cemento

Comparando estas secciones con las únicas normalizadas hasta la fecha y que se incluyen en las Recomendaciones de Proyecto y Construcción de Firmes y Pavimentos<sup>(7)</sup> de la Junta de Castilla y León se observan los siguientes cambios:

- En las citadas Recomendaciones solo se consideran secciones de firme reciclado in situ con cemento para categorías de tráfico pesado T21 e inferiores y no aparecen soluciones para tráficos T1, T0 y T00 como las propuestas.
- La sección propuesta en las Recomendaciones para diferentes tráficos varía en algunos casos de acuerdo a los siguientes cambios:

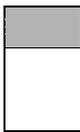
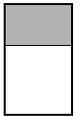
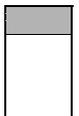
Categoría tráfico pesado	Sección Recomendaciones Junta Castilla y León	Sección propuesta
T21	 12 35	
T22	 12 30	
T31	 12 25	 10 30
T32	 10 25	
T41	 8 22	 8 25
T42	 5 20	 5 25

Figura 145. Comparación secciones recicladas normativa Junta de Castilla y León – catálogo propuesto

La sección propuesta para categoría de tráfico T31 incrementa en 5 centímetros el espesor de capa reciclada de las Recomendaciones de la Junta de Castilla y León, y reduce en 2 cm el espesor la mezcla bituminosa, con lo que se aminoran las tensiones tangenciales en la fibra inferior de la capa reciclada con cemento ( 3,10 frente a 3,48 kp/cm<sup>2</sup>). Se consigue así una sección más duradera, de mayor capacidad de soporte (76.656.158 ejes equivalentes de 13 t frente a 51.346.036) y mejor comportamiento, a la vez que resulta algo más económica.

Aunque las secciones incluidas en las Recomendaciones para tráfico T4 pudieran parecer estructuralmente aceptables, se ha considerado oportuno incrementar el espesor de la capa reciclada, al aumentar con ello considerablemente la capacidad estructural de todo el firme, con un reducido incremento de coste.



---

## **CAPÍTULO 8**



## **RESUMEN Y CONCLUSIONES**



## **8. RESUMEN Y CONCLUSIONES**

### **8.1. INTRODUCCIÓN. RAZONES DE LA TESIS**

El reciclado de firmes in situ con cemento es una técnica relativamente joven de rehabilitación de carreteras por la que se consigue transformar un firme deteriorado en una capa nueva de base de notable capacidad estructural, aprovechando la misma carretera como cantera o fuente de suministro de áridos.

Frente a otras soluciones de rehabilitación, el reciclado con cemento de los firmes agrietados y fatigados permite el aprovechamiento de estas capas deterioradas, logrando recuperar su capacidad de soporte y unas características físico-mecánicas acordes con los requerimientos necesarios para permitir un adecuado nivel de servicio. Técnicamente, se consigue además un firme en conjunto mucho más duradero, con menor susceptibilidad al agua y mayor resistencia a la erosión.

Se trata de una técnica íntimamente ligada al concepto de sostenibilidad. A todas las ventajas técnicas se suman importantes beneficios económicos (menor coste, ausencia de central de fabricación, supresión del transporte, ...) y óptimas repercusiones medioambientales derivadas del aprovechamiento de los áridos existentes, que evita la apertura de graveras o la sobreexplotación de las actuales. Además, no requiere el empleo de vertederos y es una técnica en frío que consume poca energía y reduce las emisiones.

En España, tras una primera experiencia en el año 1992 de apenas 12 km, la superficie reciclada cada año ha ido creciendo progresivamente hasta 2006, año en el que se produce un importante salto. Desde entonces, se viene reciclando una superficie anual de unos 2,5 millones de metros cuadrados, lo que representa actualmente casi 21 millones de metros cuadrados de carreteras recicladas in situ con cemento en nuestro país.

Este crecimiento constructivo, que se produce simultáneamente en otros países de similar entorno económico, ha ido ligado a un soporte técnico, con la realización de un gran número de jornadas y la publicación de la normativa correspondiente, aunque esta solo incluye prescripciones sobre las características del material. Únicamente la Junta de Castilla y León dispone de una reglamentación que incluye un catálogo de secciones en las que se definen los espesores de la capa a reciclar y los de mezcla bituminosa de cobertura, pero incluso en este caso, dada la carencia de estudios de investigación del material reciclado, dicha normativa se basa en la experiencia y en la semejanza del material reciclado con el suelocemento, unidad de la que se tiene mayor conocimiento.

Por otro lado, el conjunto de combinaciones de los componentes (material bituminoso y material granular) que puede formar el firme que se recicla es prácticamente infinito, variando desde 0/100, lo que equivale a un suelocemento o gravacemento, a 100/0, situación

que corresponde con el reciclado de una mezcla bituminosa, solución estudiada en otros trabajos.

Ante esta laguna de conocimiento, en esta tesis doctoral, además del esfuerzo por analizar toda la bibliografía disponible, se ha realizado un trabajo de recogida de información de las características de las carreteras recicladas con cemento en Castilla y León, comunidad donde se han llevado a cabo más del 50% de las obras de reciclado in situ con cemento en España. Tras analizar los porcentajes de material bituminoso / material granular de los firmes reciclados, se ha buscado y tomado muestras de una carretera con una sección de firme a reciclar con porcentajes representativos de la generalidad, a pesar de la gran variación que se produce incluso en tramos contiguos de una misma obra.

Así, en este trabajo se realiza un completo estudio del material obtenido de una carretera reciclada en Salamanca (SA-801, de Peñaranda de Bracamonte a Campo de Peñaranda) con un firme formado por el 33% de mezclas bituminosas agotadas y el 67% de material granular, caracterizando y relacionando sus cualidades mecánicas y definiendo las leyes de comportamiento.

Para optimizar el dimensionamiento de los firmes reciclados con cemento, en base a las características del material ensayado y de las leyes de fatiga y comportamiento obtenidas, se desarrolla una propuesta de catálogo de secciones que cubra la laguna existente de la normativa actual al respecto.

A continuación se recuerda brevemente los objetivos de esta tesis:

- Estudio de los materiales obtenidos en los reciclados in situ con cemento llevados a cabo hasta la fecha en Castilla y León.
- Obtención de las resistencias a corto y largo plazo, tanto a compresión y tracción indirecta como a flexotracción, del material obtenido en el reciclado de la carretera SA-801, valores que nunca han sido medidos hasta la fecha en España, pues las resistencias a largo plazo se han estimado siempre por las correlaciones entre las propiedades mecánicas de materiales similares como el suelocemento.
- Correlación entre estas resistencias y la resistencia a compresión a corto plazo (7 días), que es la que se mide y controla en las obras como parámetro determinante de la calidad de esta unidad.
- Caracterización del comportamiento del material reciclado a fatiga, obteniendo la ley de fatiga del material (que actualmente no se conoce) y comparación con las normalizadas para el suelocemento y la gravacemento (similares a un reciclado en los que no hay ningún porcentaje de mezcla bituminosa residual).
- Medición de los módulos de rigidez del material

- Caracterización del material reciclado y desarrollo de propuestas que puedan definir un catálogo de secciones de firmes reciclados, optimizando las secciones en función de la categoría de tráfico pesado.
- Mejora del ciclo de vida del firme de la carretera y a través de este, reducción del consumo energético y de materias primas con la promoción de la técnica del reciclado in situ con cemento, contribuyendo así a la sostenibilidad de la carretera en el medio.

## **8.2. MATERIAL RECICLADO EN ESTUDIO. ENSAYOS REALIZADOS**

La muestra de firme obtenida de la carretera SA-801 corresponde a los 30 cm superiores, formados por 10 cm de mezclas bituminosas y 20 cm de material granular, con un porcentaje teórico 33/67. En el transporte y en el laboratorio se mezclan y homogenizan las 2,5 t de material recibido, recogido tras su trituración por el paso de una recicladora Wirtgen 2500. El huso granulométrico entra dentro del huso establecido para el suelocemento SC40 en el Pliego PG-3 del Ministerio de Fomento.

En el laboratorio, tras el correspondiente estudio de dosificación que corrobora el realizado en la obra, el material se mezcla con un 3,5% de cemento ESP VI-1 32,5 N procedente de la fábrica de La Robla (León) y un 7,61% de agua que corresponde a la humedad óptima del ensayo Proctor modificado (norma UNE 103501) obtenida en el laboratorio y algo ligeramente superior a la obtenida en obra. La densidad a obtener en las probetas es 2,10 g/cm<sup>3</sup>, que es la densidad máxima Proctor determinada en el laboratorio.

Para fabricar las probetas con la densidad requerida, se realizan los ensayos oportunos para determinar el tiempo y la frecuencia del martillo Kango en el caso de las probetas cilíndricas (de Ø 15,24 cm x 17,78 cm), y el tiempo de vibración de la mesa y el peso de los contrapesos en el caso de las probetas prismáticas (de 60 x 15 x 15 cm).

Los componentes se dosifican con precisión utilizando una balanza y se mezclan en una amasadora de eje vertical de 200 litros. Las probetas cilíndricas se fabrican en 3 capas con la máxima frecuencia (1.950 rpm) del martillo Kango y un tiempo de compactación de 15 segundos.

Las probetas prismáticas se fabrican en una mesa de vibro-compactación sobre la que se acopla el molde prismático sujeto con 4 mordazas con unos topes o rigidizadores metálicos. Para su fabricación se emplea un contrapeso de 34,10 kg y se vibrocompactan durante 15 segundos. Con cada amasada se fabrican sólo 2 probetas, con el fin de no superar el plazo de trabajabilidad del material.

En total se fabrican 60 probetas cilíndricas que se ensayan de la siguiente manera:

- 15 en pruebas de dosificación

- 17 en ensayos de resistencia a compresión simple según NLT 305/90
- 10 en ensayos de resistencia a tracción indirecta según UNE-EN 12390-6
- 18 para obtener el módulo de elasticidad según ASTM C469-94

Además, se fabrican 106 probetas prismáticas que se ensayan a diferentes edades de acuerdo con el siguiente esquema:

- 14 en pruebas de dosificación
- 37 en ensayos estáticos de resistencia a flexotracción según UNE-EN 12390-5
- 55 en ensayos dinámicos de rotura a fatiga.

Cada una de las mitades obtenidas en la rotura de las probetas prismáticas a flexotracción y a fatiga se ensayan a compresión y tracción indirecta ( $92 \times 2 = 184$  ensayos más), por lo que el número total de ensayos realizados es 350.

También se ha realizado una tomografía axial computerizada de dos de las probetas cilíndricas fabricadas en la que se puede analizar la composición de cada sección a distinta altura y preparar un modelo tridimensional.

### **8.3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS**

#### **8.3.1. Ensayos realizados en la obra**

En obra se ha realizado un estudio previo de dosificación con el material reciclado y contenidos variables de cemento del 2,5%, 3,5% y 4,5 %. De su análisis se concluye que la varianza de la resistencia (promedio de los cuadrados de las desviaciones de los datos respecto a su media) disminuye al aumentar el contenido de cemento, lo que es lógico al permitir un mezclado mejor y una mayor homogeneización. Por eso y debido a la mayor variabilidad de las características del material en obra, la dotación de cemento debe superar siempre un valor mínimo (3% según la normativa vigente), evitando dotaciones muy estrictas que puedan generar problemas posteriores (cualquier incremento de finos puede provocar una caída de resistencias y problemas mucho más costosos de resolver a posteriori).

La relación y dependencia existente entre la resistencia a compresión y la densidad queda contrastada, como ya se ha demostrado en un gran número de trabajos realizados al respecto, reduciéndose exponencialmente la resistencia a compresión obtenida a cualquier edad, a medida que es menor la densidad obtenida en la probeta. En el caso concreto de la obra, a pesar de disponer de un gran número de datos, no se puede establecer una relación válida con carácter general debido a la variabilidad de las características del material reciclado a lo largo de los diferentes tramos de la obra.

### 8.3.2. Probetas cilíndricas

En los ensayos realizados de resistencia a compresión con probetas cilíndricas también se corrobora la dependencia de esta resistencia respecto a la densidad obtenida. Además se observa claramente que a ciertas edades se obtienen diferentes resistencias para cada amasada (aunque las 3 probetas de cada amasada arrojan resultados muy similares), lo que da idea de la variabilidad de las características del material, que dependen de parámetros como la granulometría, el contenido de finos o el porcentaje de partículas con envuelta bituminosa.

Los resultados medios obtenidos de resistencia a compresión y los incrementos de resistencia con la edad son los siguientes:

Tabla 167. Resistencias medias a compresión en probeta cilíndrica (MPa)

Edad	7 días	28 días	90 días	Δ 7-28 días	Δ 28-90 días	Δ 7-90 días
Rc	2,62	3,17	3,96	20,99%	24,92%	51,15%

Se puede concluir que la resistencia a compresión a noventa días ( $R_{C,90d}$ ) es una vez y media la resistencia a compresión a 7 días ( $R_{C,7d}$ ), siendo este el parámetro que se controla en obra:

$$R_{C,90d} = 1,5 R_{C,7d}$$

La evolución de resistencias a compresión viene dada por la siguiente gráfica, cuya línea tiende a la horizontal:

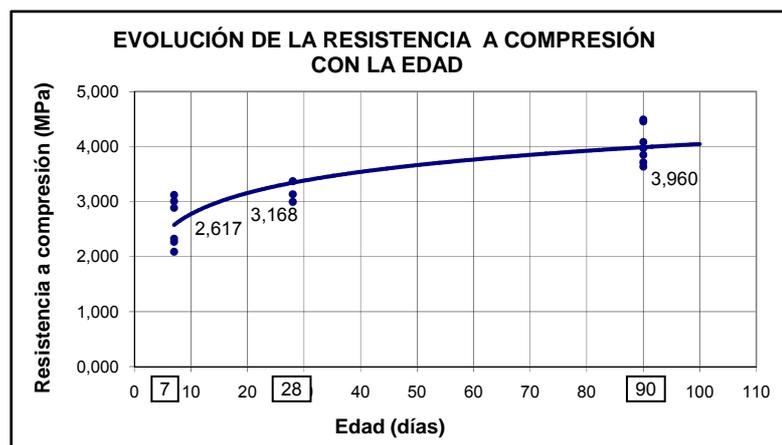


Figura 146. Evolución de la resistencia a compresión media en probeta cilíndrica Ø 15,24 x 17,78 cm

En cuanto a la resistencia a tracción indirecta, también se puede establecer una relación estadísticamente significativa entre la resistencia y la densidad. Los resultados medios obtenidos y su evolución son los siguientes:

Tabla 168. Resistencias medias a tracción indirecta en probeta cilíndrica (MPa)

Edad	7 días	28 días	90 días	Δ 7-28 días	Δ 28-90 días	Δ 7-90 días
R <sub>ti</sub>	0,19	0,26	0,39	36,84%	50,00%	105,26%

La resistencia a tracción a largo plazo (R<sub>ti,90d</sub>) es dos veces la resistencia obtenida a 7 días (R<sub>ti,7d</sub>):

$$R_{ti,90d} = 2 R_{ti,7d}$$

La gráfica de evolución de la resistencia a tracción indirecta con la edad crece algo más rápido al principio que la de resistencia a compresión, aunque ambas tienden a la horizontal, es decir a un valor de resistencia estable a largo plazo:

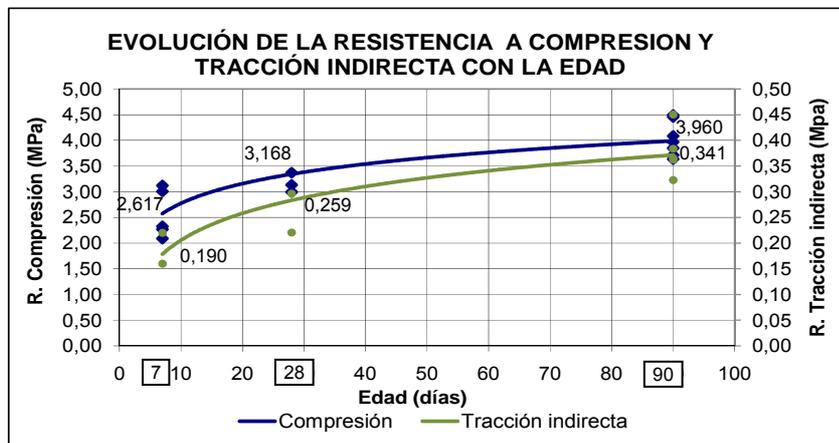


Figura 147. Evolución de la resistencia a compresión y tracción indirecta con la edad

La relación entre ambas resistencias a largo plazo y con la resistencia a compresión medida a los 7 días, parámetro que se controla en obra, viene definida por las siguientes expresiones:

$$R_{ti,90d} = 0,1 R_{c,90d}$$

$$R_{ti,90d} = 0,15 R_{c,7d}$$

en las que “R<sub>ti</sub>” y “R<sub>c</sub>” representan la resistencia a tracción indirecta y a compresión respectivamente a la edad especificada (X<sub>d</sub> = X días).

### 8.3.3. Probetas prismáticas. Ensayos de flexotracción

Las resistencias obtenidas a flexotracción de las probetas fabricadas en la 1ª fase del estudio durante los años 2007 y 2008, con un material homogenizado y acopiado en su totalidad en el interior del laboratorio, arroja resultados lógicos creciendo con la edad, al igual

que el resto de resistencias obtenidas (compresión y tracción indirecta). Ahora bien, en la 2ª fase (años 2009 y 2010), aunque se empleó el mismo material traído de una sola vez de la obra, las probetas fabricadas han resultado ser más heterogéneas en cuanto a contenido de parte bituminosa y parte granular, así como en la cantidad de finos (que pasaron un invierno a la intemperie), por lo que los resultados son mucho más variables. A esta situación se ha sumado además, la necesidad de tener que compartir las prensas con otros estudios de investigación, lo que ha aplazado en algún caso la rotura de ciertas probetas que no se han podido ensayar a edades concretas.

En cualquier caso, estos ensayos resultan muy importantes al permitir conocer la resistencia real del material a flexotracción, valor que no se había medido hasta ahora en España y se obtenía por correlaciones entre las propiedades mecánicas de otros materiales similares.

Sin considerar los valores obtenidos en esta segunda fase, cuyos resultados se han obtenido entre 80 y 435 días de madurez de las probetas con resultados muy variables (entre 0,363 y 0,633 MPa), los resultados de resistencia a flexotracción obtenidos son:

Tabla 169. Incremento de resistencia a flexotracción con la edad (probetas prismáticas)

Edad	7 días	28 días	90 días	Δ 7-28 días	Δ 28-90 días	Δ 7-90 días
R <sub>f</sub>	0,452	0,535	0,693	18,36%	29,16%	52,88%

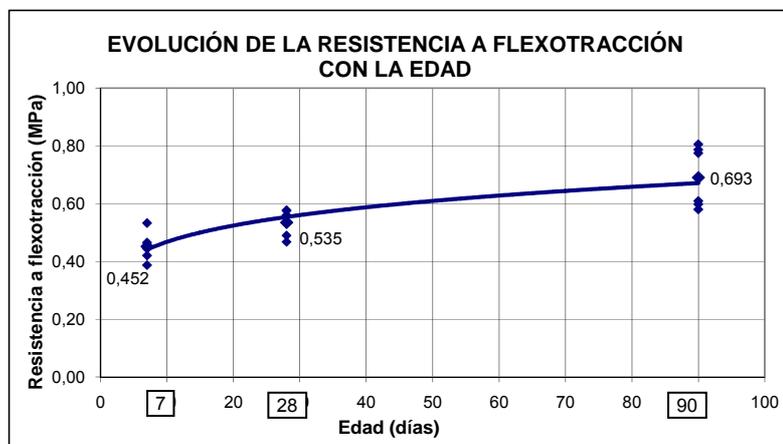


Figura 148. Evolución de la resistencia a flexotracción con la edad de las probetas prismáticas

Es decir, se puede afirmar con cierto margen de seguridad, que la resistencia a flexotracción a largo plazo del material reciclado alcanza aproximadamente 1,5 veces la resistencia obtenida a 7 días:

$$R_{f,90d} = 1,5 R_{f,7d}$$

La densidad de las probetas prismáticas disminuye en la cámara de curado a cualquier edad. Es decir, las probetas pierden peso debido a la traslación de la humedad desde el interior

de la probeta hacia el exterior, con posterior pérdida de parte de esta humedad, lógicamente muy inferior a la que se produciría si no estuviera en ambiente saturado.

No se ha obtenido ninguna relación directa a largo plazo entre la densidad de la probeta y su resistencia a flexotracción, dado que la probeta rompe por la sección más débil situada en el tercio central comprendido entre los dos rodillos de carga superiores (donde el momento es constante). Solo en el caso de que las probetas estén correctamente fabricadas y el material sea homogéneo, como sucedió en la primera fase, se puede establecer esta relación. Para el caso del material reciclado objeto del estudio a los 28 y 90 días ha resultado ser (“R<sub>f</sub>” es la resistencia a flexotracción y “d” la densidad de la probeta):

$$R_f = 1,7 d - 3,0$$

De cada ensayo de flexotracción se obtienen dos medias probetas que se rompen posteriormente a compresión y a tracción indirecta. La evolución de la resistencia de estas medias probetas resulta la siguiente:

Tabla 170. Evolución de las resistencias de las medias probetas obtenidas del ensayo de flexotracción

RESISTENCIA	7 días	28 días	90 días	Largo plazo	Δ 7-28 días	Δ 28-90 días	Δ 7-90 días	Δ 7-L.P.
COMPRESIÓN R <sub>C</sub>	2,351	3,309	3,735	4,807	40,75%	12,87 %	58,87 %	104,47 %
TRACCIÓN INDIR. R <sub>ti</sub>	0,252	0,315	0,437		25,00%	38,73%	73,41%	

En las resistencias ensayadas a tracción indirecta a largo plazo (de 104 a 180 días) se han obtenido resistencias inferiores (con un valor medio máximo de 0,476 MPa a los 82 días) debido a la variabilidad de las características del material.

La evolución de las resistencias de estos semiprismas obtenidos del ensayo a flexotracción queda reflejada en la siguiente gráfica:

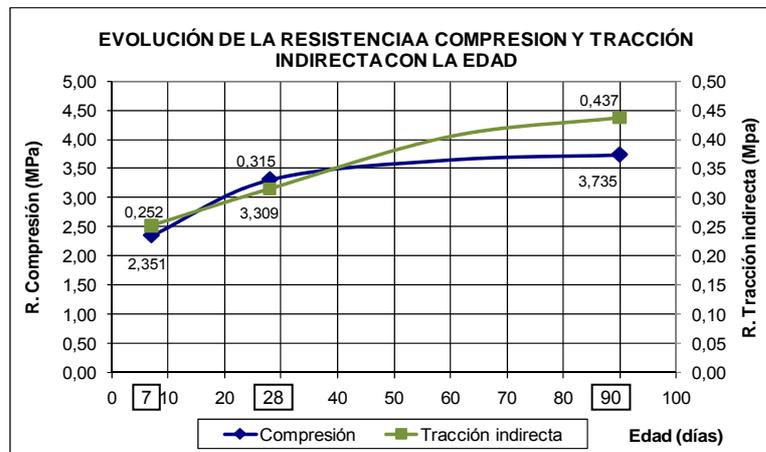


Figura 149. Evolución de la resistencia a tracción indirecta y a compresión de los semiprismas obtenidos del ensayo a flexotracción

En estos ensayos se ha corroborado la relación ya expuesta de que la resistencia a compresión a 90 días suele ser una vez y media la obtenida a los 7 días (que es la que se controla en obra por la necesidad de disponer de resultados a corto plazo), pero se comprueba que a mayor plazo esta se incrementa llegando a valores 1,8 o incluso 2 veces superior según las características del material.

$R_{c,90d} = 1,5 R_{c,7d}$
$R_{c,LP} = 1,8 - 2 R_{c,7d}$

El incremento de resistencia a tracción indirecta del material de 7 a 90 días es muy superior ( $K=1,73$ ) al obtenido con la resistencia a flexotracción y a compresión (1,53 y 1,58 respectivamente), aunque inferior al obtenido con probetas cilíndricas ( $K=2$ ).

Como en el caso de resistencias a flexotracción, no se pueden incluir los datos obtenidos en la segunda fase por la variabilidad de las características del material, que hace que se obtengan a edades mayores, resistencias incluso más bajas que a cortas edades. Por eso, se obtiene una relación del orden  $R_{ti,90d} = 1,73 R_{ti,7d}$  que no llega al valor de  $R_{ti,90d} = 2 R_{ti,7d}$  obtenido para probetas cilíndricas.

En comparación con los resultados obtenidos a tracción indirecta sobre probeta cilíndrica, los valores obtenidos a la edad de 7 días son muy superiores (0,25 MPa frente a 0,19 MPa) y aunque los valores siguen siendo mayores en las diferentes edades ensayadas, la evolución o el incremento proporcional de resistencias con la edad resulta inferior.

De forma resumida las resistencias medias obtenidas con las probetas prismáticas rotas a flexotracción y las obtenidas con sus dos mitades son:

Tabla 171. Resistencias medias de las probetas prismáticas ensayadas y de sus mitades

	7 días	28 días	90 días	Largo plazo
Flexotracción	0,452	0,535	0,693	Muy variable 0,529 – 0,693
Compresión	2,351	3,309	3,735	4,807
Tracción indirecta	0,252	0,315	0,437	Muy variable 0,333 a 0,476

Como es lógico existe una relación directa entre la resistencia a flexotracción y la resistencia a compresión, aumentando una a medida que lo hace la otra. La varianza es muy baja y disminuye con la edad en los resultados obtenidos en el primer periodo (años 2007 y 2008) por el mayor efecto del conglomerante, sin embargo crece algo cuando se incluyen los valores del segundo periodo por ser un material de características variables, en el que se obtienen resistencias también algo más bajas.

La relación determinada entre las diferentes resistencias viene definida de forma aproximada por las ecuaciones:

$$\begin{aligned} R_{f,LP} &= 0,11 R_{C,LP} + 0,17 & R_{f,LP} &= 1,03 R_{ti,LP} + 0,19 \\ R_{f,LP} &= 0,20 R_{C,7d} + 0,17 & R_{f,LP} &= 2 R_{ti,7d} + 0,19 \end{aligned}$$

Y respecto a la relación entre resistencia a compresión y a tracción indirecta se confirman las relaciones ya establecidas para probetas cilíndricas en el apartado 8.3.2 de estas conclusiones:

$$R_{ti,LP} = 0,1 R_{C,LP} = 0,15 R_{C,7d}$$

En cualquier caso las correlaciones entre las propiedades mecánicas deben utilizarse únicamente para estimar órdenes de magnitud.

#### **8.3.4. Probetas prismáticas. Ensayos dinámicos de fatiga**

De las 106 probetas prismáticas fabricadas, estaba previsto romper 56 probetas en el ensayo dinámico a fatiga, pero sólo se obtuvieron 52 resultados válidos. Previamente se había realizado una clasificación en tres grupos, distribuidos según la carga máxima y mínima que se aplica sinusoidalmente hasta la rotura, ensayándose el siguiente número de probetas en cada grupo:

- 6 probetas en el grupo G1: carga máx – mín = 50 – 25% de la tensión rotura
- 19 probetas en el grupo G2: carga máx – mín = 65 – 30% de la tensión rotura
- 31 probetas en el grupo G3: carga máx – mín = 80 – 40% de la tensión rotura

Para definir la tensión de rotura, es decir la resistencia a flexotracción de la probeta, se han seguido las siguientes pautas:

- en las probetas fabricadas en la primera fase (años 2007 – 2008 aunque ensayadas en los años 2008 – 2009), se consideran 0,69 MPa obtenidos de resistencia media a flexotracción a los 90 días con dicho material.
- en el resto de las probetas fabricadas en la segunda fase (2009 – 2010), se modifica la tensión de rotura introducida en la prensa dinámica, utilizando la resistencia a flexotracción obtenida en la probeta gemela fabricada en la misma amasada (y por tanto de similar edad), o la resistencia a flexotracción esperada si no se ha ensayado una probeta gemela.

Aplicando pues una carga sinusoidal variable entre los porcentajes máximo y mínimo de la carga fijada para cada probeta en función del grupo y tensión de rotura, se ensayan las probetas prismáticas en la prensa dinámica hasta su rotura por fatiga. Mientras que algunas de las probetas rompen a las pocas horas, otras llegan a aguantar semanas enteras con carga durante todo el día y toda la noche. El número de ciclos soportado ha sido el siguiente:

Tabla 172. Número de ciclos de carga soportado por cada probeta a fatiga

Probeta n°	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Días de curado	Carga teórica	Tensión de rotura R <sub>f</sub> (MPa)	Tiempo (h)	Nº de ciclos
AP7.1	2,0389	50	G1 (50-25%)	0,69	180,56	3.250.000
AP7.2	2,0265	57	G2 (65-30%)	0,69	93,06	1.340.000
FG1.1	2,1312	155	G3 (80-40%)	0,69	0,01	74
FG1.2	2,1105	156	G3 (80-40%)	0,69	0,00	0 (en carga)
FG1.3	2,0637	157	G3 (80-40%)	0,69	4,15	104.534
FG1.4	2,0899	158	G3 (80-40%)	0,69	0,53	13.473
FG1.5	2,0885	205	G1 (50-25%)	0,69	20,29	511.365
FG1.6	2,0720	206	G2 (65-30%)	0,69	0,28	7.042
FG2.1	2,0995	137	G2 (65-30%)	0,69	201,59	5.080.000
FG2.2	2,1077	186	G2 (65-30%)	0,69	43,57	1.097.880
FG2.3	2,0582	189	G1 (50-25%)	0,69	740,04	18.648.940
FG2.4	2,0582	294	G1 (50-25%)	0,69	11,85	298.501
FG2.5	2,0637	169	G3 (80-40%)	0,69	99,81	2.515.244
FG2.6	2,0444	183	G3 (80-40%)	0,69	0,13	3.217
FG3.1	2,0843	275	G1 (50-25%)	0,69	209,74	5.285.353
FG3.2	2,0843	284	G1 (50-25%)	0,69	455,85	11.487.356
FG3.3	2,0403	329	G2 (65-30%)	0,69	0,92	23.157
FG3.4	2,0582	333	G2 (65-30%)	0,69	455,42	11.476.510
FG3.5	2,0802	327	G3 (80-40%)	0,69	865,05	21.799.325
FG3.6	2,0857	479	G3 (80-40%)	0,69	0,05	1.357
FG4.3	2,0609	435	G3 (80-40%)	0,69		0 (en carga)
FG4.5	2,0788	438	G3 (80-40%)	0,69	0,40	10.108
FG4.6	2,0554	438	G2 (65-30%)	0,69	0,08	2.011
FG5.2	2,0802	103	G3 (80-40%)	0,366	0,03	868
FG6.2	2,0954	79	G3 (80-40%)	0,538	0,51	12.884
FG6.4	2,0114	80	G2 (65-30%)	0,667	1,37	34.589
FG6.6	2,0582	84	G3 (80-40%)	0,5	0,06	1.561
FG6.7	2,1807	100	G3 (80-40%)	0,221	0,12	2.913
FG6.9	2,1532	126	G2 (65-30%)	0,638	16,91	426.140
FG6.11	2,1477	132	G2 (65-30%)	0,69	511	13.096.690
FG6.13	2,0967	178	G3 (80-40%)	0,69	2,35	59.306
FG6.14	1,9880	178	G3 (80-40%)	0,6	83,49	2.103.978
FG6.15	2,1367	181	G3 (80-40%)	0,69	0,00	42
FG6.16	2,0541	182	G3 (80-40%)	0,6	0,00	74
FG7.1	2,0664	175	G3 (80-40%)	0,69	0,00	48
FG7.3	2,1752	176	G3 (80-40%)	0,69	0,00	123
FG7.4	2,2014	176	G3 (80-40%)	0,6	0,05	1.245
FG8.1	2,1546	177	G3 (80-40%)	0,69	0,60	15.179
FG8.3	2,0733	177	G3 (80-40%)	0,69	0,04	1.126
FG8.4	2,1738	180	G3 (80-40%)	0,6	10,09	254.205
FG8.5	2,1573	180	G3 (80-40%)	0,69	0,04	1.052
FG8.6	2,1435	180	G3 (80-40%)	0,6	0,11	2.849
FG9.2	2,0637	200	G2 (65-30%)	0,6	0,86	21.555
FG9.3	2,0830	182	G3 (80-40%)	0,69	0,01	129
FG9.5	2,0981	182	G3 (80-40%)	0,69	0,00	64
FG9.6	2,1367	183	G3 (80-40%)	0,6	0,30	7.567
FG9.7	2,0830	195	G2 (65-30%)	0,69	2,79	70.348
FG9.8	2,1160	183	G3 (80-40%)	0,6	0,06	1.579
FG9.9	2,0899	194	G2 (65-30%)	0,69	11,62	292.855
FG9.10	2,1256	196	G2 (65-30%)	0,6	72,15	1.818.254
FG10.2	2,0912	119	G2 (65-30%)	0,561	95,41	2.404.230

Probeta n°	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Días de curado	Carga teórica	Tensión de rotura R <sub>f</sub> (MPa)	Tiempo (h)	Nº de ciclos
FG10.3	2,0830	127	G2 (65-30%)	0,5385	253,97	6.400.000
FG10.5	2,1256	139	G2 (65-30%)	0,669	96,51	2.432.106
FG11.2	2,1229	93	G2 (65-30%)	0,6	7,55	217.296
FG11.3	2,1972	106	G3 (80-40%)	0,6	1,27	41.102
FG11.4	2,1931	108	G2 (65-30%)	0,6	1,97	70.943

De manera similar a lo realizado con las probetas ensayadas a flexotracción, las mitades obtenidas de la rotura de la probeta prismática a fatiga, se ensayan a compresión y a tracción indirecta.

Los resultados de resistencia a compresión y a tracción indirecta obtenidos con estas mitades según la edad de la probeta se recogen en las gráficas siguientes. La relación establecida entre los parámetros puede resultar poco precisa debido al elevado número de factores que intervienen, como la diferente composición del material reciclado de cada probeta (a pesar de haberse homogeneizado en el laboratorio), la diferente densidad obtenida o la tensión residual al haber estado sometidas previamente estas medias probetas a carga en el ensayo de fatiga.

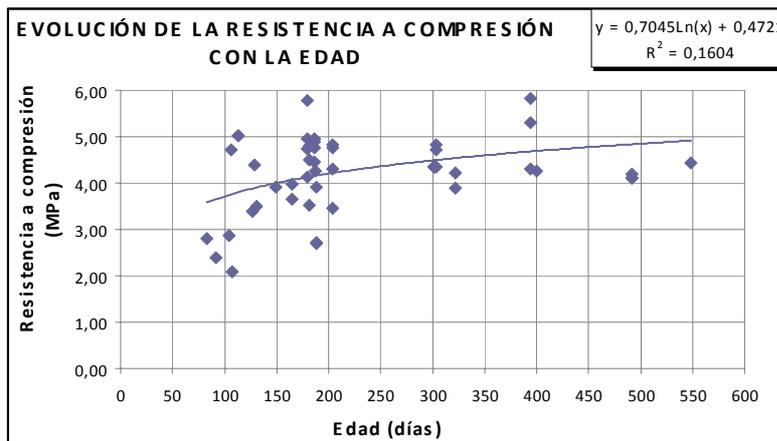


Figura 150. Evolución de la resistencia a compresión de los medios prismas obtenidos del ensayo de fatiga

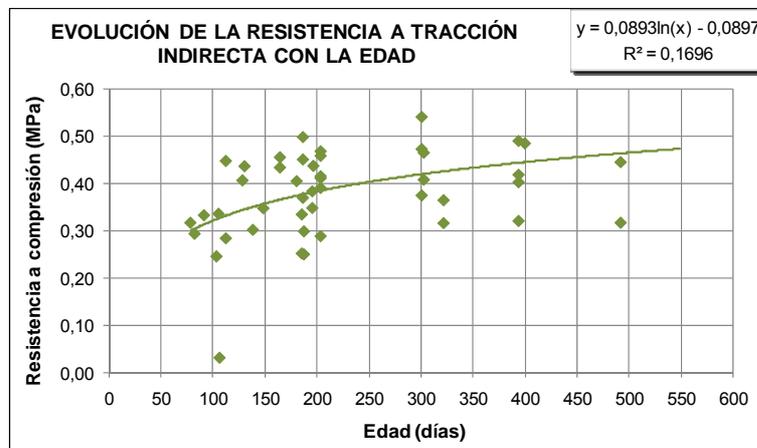


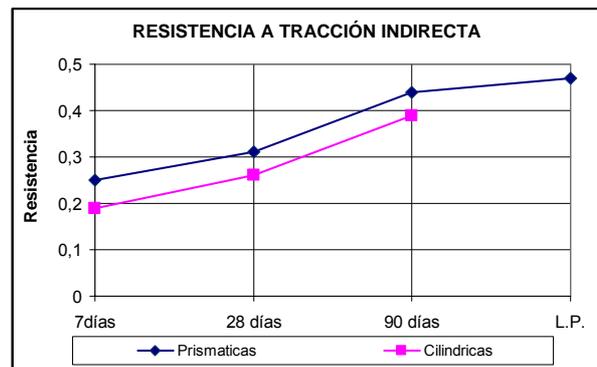
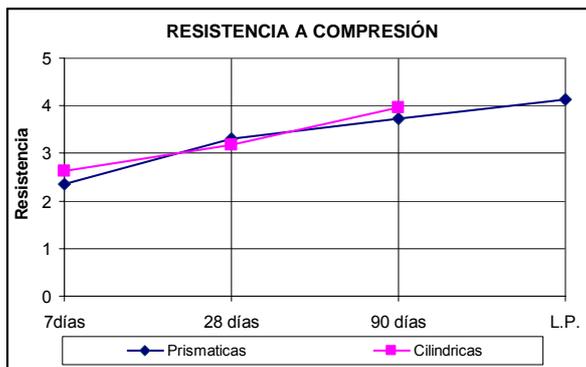
Figura 151. Evolución de la resistencia a tracción indirecta de los medios prismas obtenidos del ensayo de fatiga

A continuación se incluye una tabla resumen con todas las resistencias obtenidas a flexotracción, a compresión y a tracción indirecta, tanto de las probetas cilíndricas, como de los medios prismas resultado de los ensayos de flexotracción y fatiga:

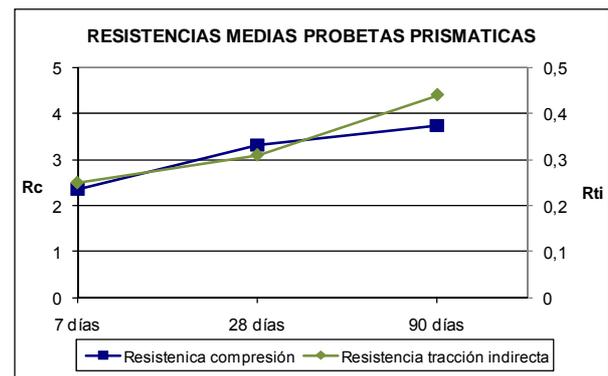
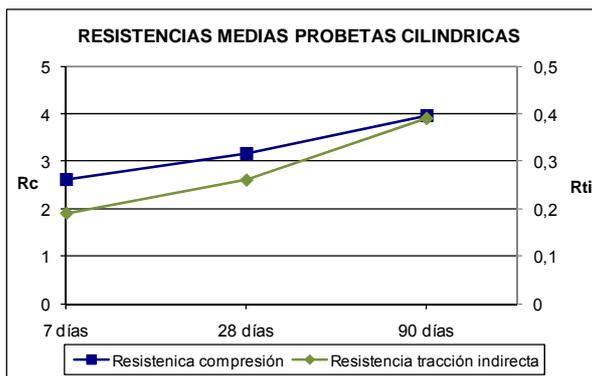
Tabla 173. Resumen de los resultados de resistencia obtenidos

Edad	7 días		28 días		90 días		Largo plazo	Coeficiente Δ 7-90 días		
Probeta	Cilíndrica	Prismática o mitades	Cilíndrica	Prismática o mitades	Cilíndrica	Prismática o mitades	Cilíndrica	Prismática o mitades	Cilíndrica	Prismática o mitades
Resistencia a compresión	2,62	2,35 (f)	3,17	3,31 (f)	3,96	3,73 (f) 2,60 (F)		4,81 (f) 5,17 (F)	1,5	1,5 (f) *
Resistencia a tracción indirecta	0,19	0,25 (f)	0,26	0,31 (f)	0,39	0,44 (f) 0,32 (F)		0,50 (F)	2	1,7 (f)
Resistencia a flexotracción		0,452		0,535		0,693				1,5

NOTA: (f) = media probeta ensayada previamente a flexotracción  
 (F) = media probeta ensayada previamente a fatiga  
 \* = a largo plazo el coeficiente puede llegar a 2



Figuras 152 y 153. Resistencias medias a compresión y tracción indirecta obtenidas con cada tipo de probeta



Figuras 154 y 155. Resistencias medias obtenidas con probetas cilíndricas y con probetas prismáticas

### 8.3.5 Tomografía axial computerizada

La TAC es la reconstrucción por medio de un ordenador de un plano tomográfico de un objeto. La tomografía se obtiene mediante el movimiento combinado del tubo de rayos X

hacia un lado mientras la placa radiográfica se mueve hacia el contrario, por lo que una superficie plana del objeto en estudio es perfectamente visible, y las áreas por encima y por debajo quedan borradas.

Se ha realizado una tomografía helicoidal de dos probetas, dispuesta una sobre la otra en la base móvil, para obtener la reconstrucción volumétrica de ambas. Aunque no se ha podido observar las probetas antes y después de su ensayo para analizar como queda cada sección tras el esfuerzo de rotura, puesto que la sección cambia completamente al romper, en la tomografía se puede observar bien la porosidad que puede haber en el interior de la probeta. En el apartado 6.8 se incluyen los fotogramas correspondientes.

#### **8.4. LEYES DE FATIGA DEL MATERIAL RECICLADO**

El comportamiento a fatiga del material reciclado con cemento se obtiene mediante el ajuste estadístico de los valores obtenidos en los ensayos de fatiga realizados, dada la dispersión existente fruto de la heterogeneidad de las características del material y de las condiciones de los ensayos.

La ley de fatiga responde a la expresión general aplicada a todos los materiales tratados con cemento y que es de la forma:

$$\frac{\sigma}{R_f} = 1 + a \cdot \log N$$

donde “ $\sigma$ ” es la tensión a flexotracción que provoca la rotura después de un número “N” de aplicaciones de carga tipo, “ $R_f$ ” la resistencia a flexotracción a largo plazo del material y “a” un coeficiente que depende del tipo de material.

Para determinar la pendiente “a” de esta recta que se representa en escala logarítmica, se calcula la recta de tendencia de los puntos ( $\sigma/R_f$ , N) obtenidos en los ensayos de rotura a fatiga de las probetas prismáticas. Esta recta viene definida por la pendiente para que sea mínima la suma de la distancia a dicha recta de cada uno de los puntos obtenidos.

Realizando el cálculo según se describe en el apartado 6.6.1, se obtiene una recta de pendiente  $a = 0,05931144$ , pero introduciendo ciertos criterios de corrección del porcentaje de la carga máxima que realmente se ha aplicado, pues algunos de los valores de esta carga fueron estimados al no disponerse entonces de las resistencias reales a flexotracción, se obtiene un valor de  $a = 0,05775497$ . Por tanto se adopta una pendiente  $a = 0,058$  y la ley de fatiga del material reciclado viene definida por la expresión:

$$\frac{\sigma}{R_f} = 1 - 0,058 \cdot \log N$$

La representación gráfica en escala logarítmica de esta ley de fatiga y la nube de puntos obtenida en los ensayos es la siguiente:

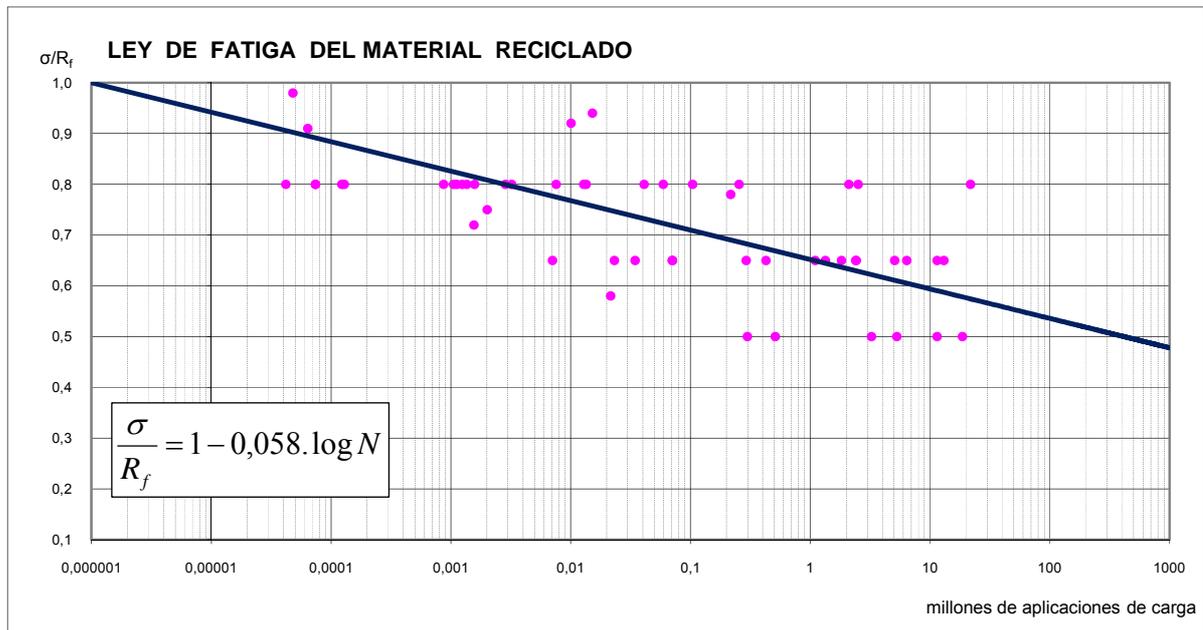


Figura 156. Ley de fatiga del material reciclado

La expresión de esta ley de fatiga en forma potencial, para buscar semejanza con la definida para materiales granulares tratados con cemento del sistema de cálculo francés, sería de la forma:

$$\sigma = 0,64 \cdot R_f \cdot \left( \frac{N}{10^6} \right)^{-0,035}$$

Posteriormente se ha calculado, la resistencia a flexotracción estimada a partir de los resultados a compresión y a tracción indirecta de cada media probeta obtenida del ensayo de fatiga, de acuerdo con las relaciones entre ambas resistencias establecidas en los ensayos anteriores de flexotracción y que son:

$$R_{f,LP} = 0,1104 R_{c,LP} + 0,1730 \quad [2]$$

$$R_{f,LP} = \frac{1}{0,281187 + \frac{5,40234}{R_c}} \quad [3] \text{ que corregida queda}$$

$$R_{f,LP} = \frac{1}{0,442802 + \frac{5,08112}{R_c}} \quad [4]$$

$$R_{f,LP} = 1,0321 R_{ti,LP} + 0,1916 \quad [5]$$

Con esta resistencia a flexotracción estimada tanto a compresión como a tracción indirecta se vuelve a calcular la ley de fatiga para corroborar la expresión obtenida. Los resultados obtenidos han sido:

- Ley de fatiga obtenida por estimación en base a los medios prismas rotos a compresión:
  - Mediante una relación lineal [2]: se obtiene una pendiente  $a = 0,06016425$ .
  - Mediante una relación doble inversa: con la fórmula [3] se obtiene  $a = 0,06029670$  y con la fórmula de mayor precisión [4] la pendiente resulta  $a = 0,05668549$ .
- Ley de fatiga obtenida por estimación en base a los medios prismas rotos a tracción indirecta con relación lineal [5]: La pendiente obtenida  $a = 0,04961921$  se ve corregida tras introducir las modificaciones necesarias obteniéndose  $a = 0,04947855$ .

Según puede apreciarse hay ligeras diferencias en el segundo decimal de la pendiente de las leyes obtenidas. De forma resumida los resultados obtenidos son:

Tabla 174. Leyes de fatiga de material reciclado obtenidas

Ley de fatiga obtenida de	Pendiente "a"
Ensayos de fatiga probetas prismáticas	0,05931144
Ensayos de fatiga probetas prismáticas con valores corregidos	0,05775497
Resistencia flexotracción estimada a partir de la compresión por relación lineal [2]	0,06016425
Resistencia flexotracción estimada a partir de la compresión por relación doble inversa [3]	0,06029670
Resistencia flexotracción estimada de la compresión por relación doble inversa corregida [4]	0,05668549
Resistencia flexotracción estimada a partir de la tracción indirecta por relación lineal [5]	0,04961921
Resistencia flexotracción estimada a partir de la tracción indirecta con valores corregidos	0,04947855

El valor de la pendiente  $a=0,058$  obtenido directamente de los ensayos de fatiga una vez corregidos algunos resultados irregulares, coincide con el valor medio que se obtiene de todos los resultados de pendiente calculados y reflejados en la tabla anterior.

Así pues se considera acertada la ley de fatiga determinada para el material reciclado con cemento representada por la relación:

$$\frac{\sigma}{R_f} = 1 - 0,058 \cdot \log N$$

La ley de fatiga calculada resulta tener coeficientes diferentes a los empleados hasta la fecha en el cálculo de firmes reciclados con cemento, en los que se asemejaba el material a un suelocemento. Para este material se suelen emplear las siguientes leyes de fatiga:

- Ministerio de fomento y Junta de Castilla y León:

$$\frac{\sigma}{R_f} = (1 - 0,080 \cdot \log N)$$

- Junta de Andalucía, Gobierno País Vasco y Generalitat Valenciana:

$$\frac{\sigma}{R_f} = (1 - 0,065 \cdot \log N)$$

En la representación gráfica de las diferentes leyes de fatiga se puede apreciar que la ley obtenida para el material reciclado tiene una pendiente muy inferior a la considerada para el suelocemento en la normativa del Ministerio de Fomento, y algo inferior a la de la gravacemento, obtenida en el Instituto Eduardo Torroja en los años 70, y que es la empleada por la mayoría de las normativas españolas:

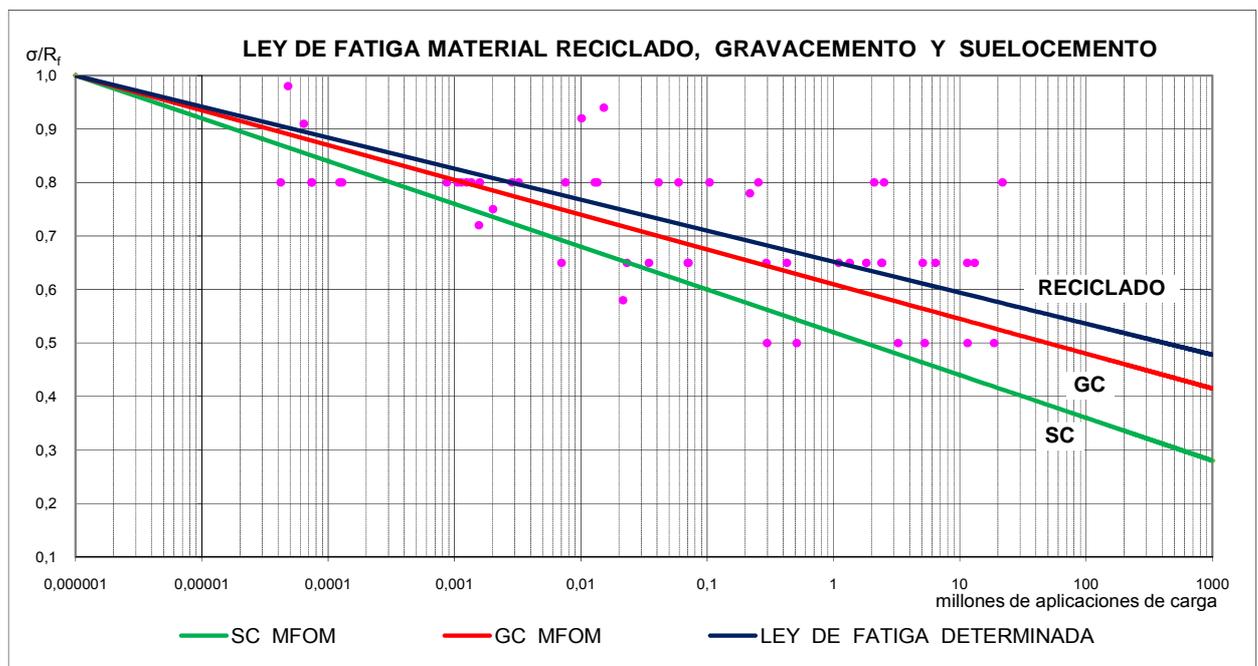


Figura 157. Leyes de fatiga de suelocemento, gravacemento y material reciclado

La menor pendiente de la ley de fatiga obtenida viene acompañada de una menor rigidez del material (menor módulo), por lo que el comportamiento a fatiga del material reciclado resulta mucho mejor que el de otros materiales tratados con cemento, con una mayor deformación elástica recuperable debido al conjunto de finos que forman el mortero bituminoso.

La ley de fatiga obtenida para el material reciclado in situ con cemento tiene una pendiente muy reducida, por lo que pequeñas disminuciones del espesor de la capa, al aumentar el valor  $\sigma/R_f$ , supone reducciones muy importantes de la vida en servicio del firme.

## **8.5. MÓDULO DE ELASTICIDAD**

El módulo de elasticidad de una capa es indicativo de su capacidad de reparto de tensiones tanto hacia las capas inferiores o superiores en caso de existir, como a la explanada.

En general, los materiales tratados con cemento presentan un comportamiento elástico marcadamente lineal al menos hasta alcanzar un porcentaje importante de su tensión de rotura, y su módulo de elasticidad se puede considerar prácticamente constante en el rango de tensiones dentro del cual suelen trabajar.

En los ensayos, realizados, a pesar de haber fabricado 18 probetas, solo se pudieron romper 15 probetas, de las cuales 3 se ensayaron a 7 días, 8 a un año y 4 con una edad superior a los dos años. A ciertos problemas de calidad de las probetas (no observados durante la fabricación), se sumó la falta de disponibilidad de una prensa que permitiera determinar el módulo dinámico, por lo que ha habido que calcular el módulo de elasticidad estático (de un 10 a un 15% inferior). Además las probetas se fabricaron con los moldes disponibles de 15,24 cm de diámetro y 17,78 cm de longitud, lo que implica una esbeltez de 1,17, cuando en la normativa existente se exige una esbeltez de al menos 1,5 (norma ASTM C469) o 2 (NLT-349) para asegurar compresión pura en el centro de la probeta.

No obstante el módulo de elasticidad dinámico determinado se puede cifrar en 5.000 MPa que resulta válido para los valores medidos en un reciclado de resistencia a compresión a largo plazo de unos 4,0 MPa. Este resulta algo inferior al definido en las bibliografías y estudios consultados para un suelocemento fabricado con una zahorra, lo que es lógico considerando que el material reciclado con cemento dispone de parte del árido rodeado de una película de betún residual y finos bituminosos que reducen claramente el módulo de elasticidad<sup>(84)</sup>. Esto no supone un peor comportamiento estructural, sino que la capa reparte mejor las tensiones recibidas con el conjunto del firme, y se adapta mejor a cualquier deformación.

## **8.6. DIMENSIONAMIENTO DE SECCIONES. PROPUESTA DE UN CATALOGO**

El reciclado in situ del firme es una técnica de rehabilitación total y por tanto independiente de las deflexiones medidas antes de su aplicación. En su dimensionamiento no interviene el nivel de deterioro previo de esta capa, pero como todas las capas del firme, está estructuralmente condicionada por la capacidad de soporte de la capa sobre la que se apoya, así como por las características del material antes y después de proceder a su reciclado, tales como el espesor y naturaleza de las capas a reciclar, el porcentaje de betún residual, el contenido y tipo de conglomerante empleado, etc.

Entre los factores de diseño a considerar se ha adoptado un periodo de proyecto de 20 años y se han empleado las características del material contempladas en el capítulo 21 del

Pliego General PG-4<sup>(5)</sup> del Ministerio de Fomento, con una resistencia a compresión mínima de 2,5 MPa a los 7 días, por lo que se emplean las características del material reciclado que se ha utilizado en los ensayos.

La clasificación del tráfico pesado se ha realizado conforme a la Norma 6.1-IC<sup>(1)</sup> del Ministerio de Fomento, subdividiendo las tres últimas categorías en dos subcategorías, de acuerdo con las Recomendaciones de Proyecto y Construcción de Firmes y Pavimentos<sup>(7)</sup> de la Junta de Castilla y León. Con los valores límites que delimitan cada subcategoría se calcula el tráfico equivalente de proyecto (TEP), es decir el número de ejes tipo de 13 toneladas que deben discurrir por el carril de proyecto del firme a diseñar en cada categoría de tráfico pesado durante el periodo de proyecto.

Tabla 175. Categorías de tráfico pesado<sup>(7)</sup>

Categoría de tráfico	T00	T0	T1	T2		T3		T4		
Subcategoría	T00	T0	T1	T21	T22	T31	T32	T41	T42	
IMD <sub>p</sub> <sup>(*)</sup>	>	4000	2000	800	400	200	100	50	25	0

<sup>(\*)</sup> Intensidad Media Diaria de vehículos pesados en el carril de proyecto y año de puesta en servicio.

Como en el caso de secciones recicladas in situ no se puede modificar las características de la explanada o capa de apoyo del firme, se han considerado además dos tipos diferentes de explanada: una perfectamente compactada y de calidad, equivalente a una E3 de acuerdo con la clasificación establecida en la Norma 6.1-IC, y otra de baja calidad con índice CBR igual a 5.

Como modelo de respuesta se ha utilizado el modelo elástico multicapa desarrollado por Burmister<sup>(81)</sup> en 1943. Para ello se ha empleado un programa de cálculo analítico con el que se obtienen los parámetros críticos que produce la carga tipo, definidos por las deformaciones y tensiones radiales y verticales en cada una de las capas del firme. Con las leyes de fatiga se obtienen el número de aplicaciones de carga tipo que es capaz de soportar cada capa del firme, y se comprueba que la sección propuesta aguanta estructuralmente.

Además, se ha estudiado la sensibilidad de estas secciones a una reducción de la capacidad de soporte de las explanadas que podría darse en cualquier tramo de la obra, comprobándose que el diseño es correcto. Otros factores de vital importancia, como asegurar la adherencia entre las capas o cumplir los espesores y las resistencias mínimas exigidas en las capas recicladas, quedan a cargo de la correcta construcción de este tipo de obras.

Como capas bituminosas se consideran los siguientes espesores y tipologías:

Tabla 176. Espesores y tipos de mezclas bituminosas consideradas en el cálculo

Categoría tráfico pesado	Espesor MB	Rodadura	Intermedia	Base
T00	20	3 cm BBTM	8 cm AC 22 bin S	9 cm AC 32 base S
T0	18	3 cm BBTM	6 cm AC 22 bin S	9 cm AC 32 base S
T1	16	3 cm BBTM	5 cm AC 22 bin S	8 cm AC 32 base S
T21	14	6 cm AC 22 surf S	8 cm AC 22 bin S	--
T22	12	6 cm AC 22 surf S	6 cm AC 22 bin S	--
T31/T32	10	5 cm AC 16 surf S	5 cm AC 22 bin S	--
T41	8	4 cm AC 16 surf S	4 cm AC 16 bin S	--
T42	5	5 cm AC 16 surf S	--	--

Los parámetros de cálculo empleados en cada capa han sido:

Tabla 177. Características de los materiales de cada capa

		E(MPa)	$\nu$	Ley de fatiga
Mezclas bituminosas		6.000	0,33	$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$
Capa rodadura discontinua		4.000	0,35	
Capa reciclada con cemento		5.000	0,25	$\sigma = 6,93 (1 - 0,058 \log N)$
Explanada	E3	200	0,35	$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$
	E1	60		

De acuerdo con todos los cálculos realizados, se proponen las siguientes secciones diseñadas en función de la categoría de tráfico:

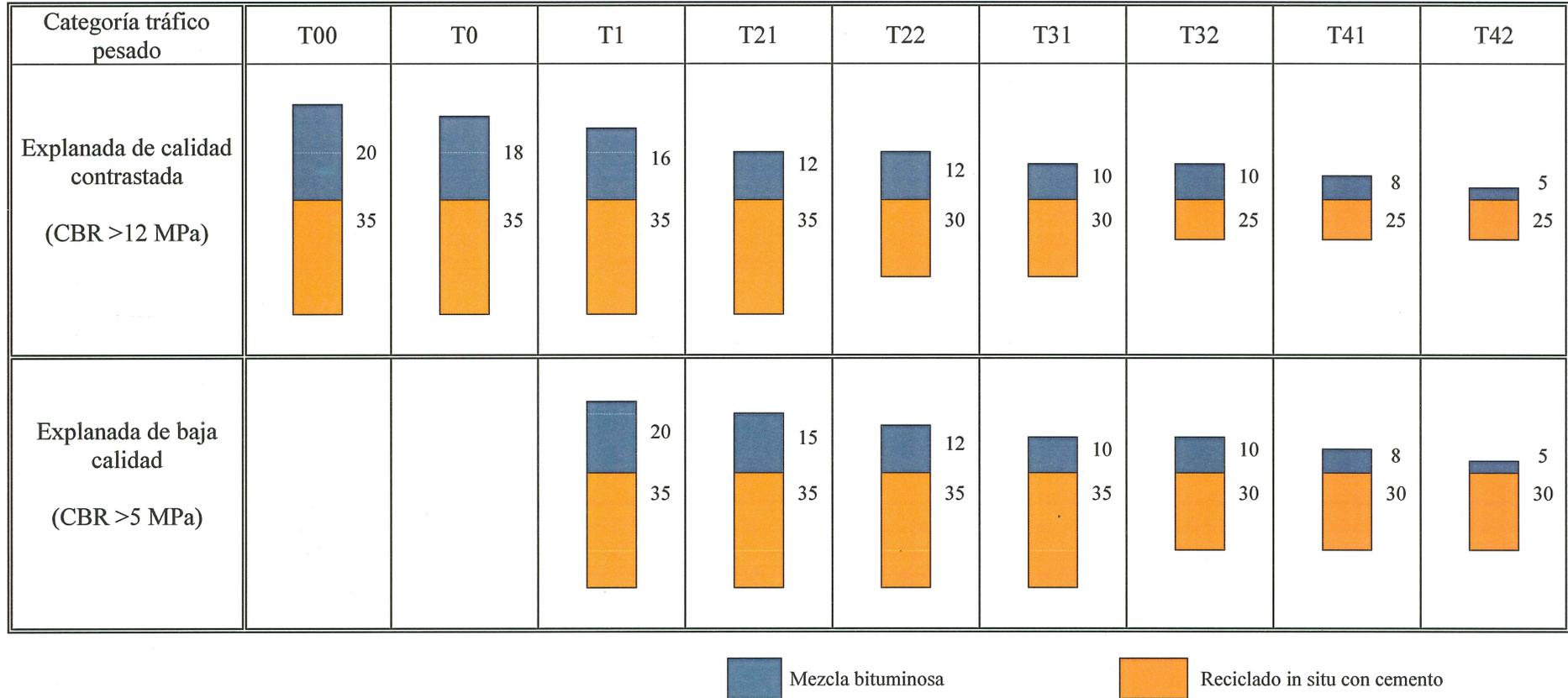


Figura 158. Catálogo de secciones de firme reciclado con cemento

## **8.7. OTRAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN ABIERTAS**

Esta tesis doctoral ha estudiado y caracterizado un material obtenido del reciclado de una carretera en Salamanca constituido por un 33% de mezclas bituminosas agotadas (10 cm) y un 67% de material granular (20 cm). Se han ensayado un total de 166 probetas, de las que 106 son prismáticas de 60x15x15 cm y se rompen a diferentes edades en cargas de fatiga y cargas estáticas a flexotracción, y 60 son cilíndricas de 15,24 cm de diámetro x 17,78 cm de alto que se ensayan a compresión y tracción indirecta, también a diferentes edades.

Todas estas características mecánicas se han relacionado entre sí y se han definido en función de la resistencia a compresión obtenida a la edad de 7 días que es el parámetro que se determina como control del material en las obras.

Además, se ha determinado la ley de fatiga y el módulo de comportamiento de este material.

Todo este proceso resulta necesario para optimizar el dimensionamiento de los firmes reciclados in situ con cemento y obtener un catálogo de secciones de firmes reciclados, basado en un cálculo conforme a los conocimientos obtenidos.

Ahora bien, el conjunto de materiales que forma el firme a reciclar con cemento en cualquier obra suele estar compuesto por dos unidades diferentes, mezclas bituminosas fatigadas o tratamientos bituminosos y capas granulares (macadam o zahorra), pero la combinación de ambas unidades arroja un excesivo número de posibilidades, tanto en los diversos tramos de una misma obra, como en obras diferentes.

Es decir, la combinación de productos bituminosos y granulares puede variar desde 0/100 (materiales tratados con cemento) hasta 100/0 (reciclado de sólo mezclas bituminosas), aunque en este último caso cuestiones económicas puedan hacer más viables otras soluciones.

En esta tesis, a pesar de ensayar 166 probetas (muchas de las cuales pesan 30 kg y hay que mover entre 2 operarios) y trabajar durante 3 años, “sólo” se ha podido caracterizar y estudiar una de las combinaciones (33/67) situación que se considera se produce en una gran parte de los reciclados que se realizan. Queda pues abierta una vía muy interesante de investigación en la que se podrían analizar otros aspectos como:

- El comportamiento y caracterización de mezclas recicladas formadas por combinación de material bituminosos/granular con proporciones 20/80, 50/50 ó 67/33 por ejemplo.
- Las leyes de fatiga de dichas mezclas analizando la sensibilidad a un mayor o menor contenido de cada uno de los materiales (sobre todo de la parte bituminosa).
- La influencia de la granulometría del material (de acuerdo con los equipos de reciclado) y especialmente de los finos, en las características y comportamiento de la mezcla final, así como la influencia del contenido de betún residual de la capa bituminosa.

- La sensibilidad al contenido de cemento en el comportamiento y características a largo plazo de la mezcla reciclada.
- Las mejoras que aportan en el comportamiento del firme y en las características del propio material reciclado, mezclas de mayor módulo o de mayor resistencia inicial (por ejemplo 3,5 MPa a 7 días), analizando los cambios en las leyes de fatiga y en el conjunto del firme.

Es decir, entre las capas granulares investigadas (Instituto Eduardo Torroja en los años 70) y las mezclas bituminosas tan ampliamente analizadas, se ofrece un amplio abanico de combinaciones y posibilidades a investigar, que requiere realizar los ensayos de laboratorio y estudios pertinentes para confirmar el comportamiento esperado en este tipo de mezclas. Con dichos estudios se ampliaría el conocimiento de las características del material reciclado, se confirmarían las relaciones entre unas variables y otras, y se podría corroborar así el diseño propuesto de nuevas secciones para firmes reciclados in situ con cemento, o mejor aún, proponer nuevas secciones para el caso de requerir una mayor resistencia inicial.

## **8.8. CONCLUSIONES**

La laguna de conocimiento técnico que existe sobre el comportamiento del material procedente del reciclado con cemento de un firme de carretera, ha justificado el esfuerzo realizado para concretar esta tesis doctoral.

De los primeros datos analizados, se ha deducido que la variabilidad de las características del material requiere que la dotación de cemento supere siempre un valor mínimo (superior al 3%) para asegurar cierta homogeneidad y cumplir las resistencias exigidas a lo largo de toda la obra. Además, se debe ser generoso en la dosificación puesto que dotaciones muy estrictas suelen generar problemas posteriores (cualquier incremento de finos puede provocar una caída de resistencias y problemas mucho más costosos de resolver a posteriori).

Se ha constatado la relación directa entre la resistencia a compresión y la densidad del material, aunque no se puede establecer una ecuación determinada debido a la variabilidad de las características del material reciclado, que depende de varios parámetros como la granulometría, el contenido de finos o el porcentaje de partículas con envuelta bituminosa. Esta relación se produce también entre la resistencia a tracción indirecta y la densidad, pero no ha quedado determinada con la resistencia a flexotracción (la sección rompe por la sección más débil del tercio central).

Las características mecánicas del material reciclado estudiado, obtenidas en un total de 350 ensayos (60 sobre probetas cilíndricas, 106 sobre prismáticas y 184 sobre los semiprismas obtenidos en los ensayos anteriores), se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 178. Características del material reciclado utilizado en la tesis

RESISTENCIA	TIPO PROBETA	EDAD			
		7 días	28 días	90 días	Largo plazo
Flexotracción	Prismatica	0,45	0,53	0,69	Muy variable 0,53 – 0,69
Compresión	Cilindrica	2,62	3,17	3,96	4,81
	Medio prisma	2,35	3,31	3,73	
Tracción indirecta	Cilindrica	0,19	0,26	0,39	Muy variable 0,33 a 0,48
	Medio prisma	0,25	0,31	0,44	

Considerando que en todas las obras, de acuerdo con lo normalizado, la calidad del material se controla por su resistencia a compresión a la edad de 7 días ( $R_{c,7d}$ ), pero su comportamiento se define por la resistencia a flexotracción a largo plazo ( $R_f$ ), se han establecido las siguientes correlaciones entre todas estas resistencias (incluida a tracción indirecta  $R_{ti}$ ), que deben considerarse únicamente para estimar ordenes de magnitud:

$$R_{c,90d} = 1,5 R_{c,7d}$$

$$R_{c,LP} = 1,8 R_{c,7d}$$

puede llegar a 2

$$R_{ti,90d} = 2 R_{ti,7d}$$

$$R_{ti,90d} = 0,1 R_{c,90d} = 0,15 R_{c,7d}$$

$$R_{f,90d} = 2 R_{f,7d}$$

$$R_{f,LP} = 0,2 R_{c,7d} + 0,17$$

$$R_{f,LP} = \frac{1}{0,442802 + \frac{2,822844}{R_{c,7d}}}$$

mayor precisión

Con los 55 ensayos dinámicos de rotura a fatiga de probetas prismáticas de 15x15x60 cm, se ha determinado la ley de fatiga del material reciclado con cemento, que responde a la expresión:

$$\frac{\sigma}{R_f} = 1 - 0,058 \cdot \log N$$

donde “ $\sigma$ ” es la tensión a flexotracción que provoca la rotura después de un número “N” de aplicaciones de carga tipo y “ $R_f$ ” la resistencia a flexotracción a largo plazo del material (que en el reciclado estudiado en la tesis ha resultado ser 0,69 MPa).

La menor pendiente de la ley de fatiga y el módulo más reducido del material reciclado respecto a otras mezclas con cemento, aseguran un mejor comportamiento a fatiga del material reciclado, con una mayor deformación elástica recuperable debido al conjunto de finos que forman el mortero bituminoso. No obstante, como en los materiales tratados con

cemento, pequeñas disminuciones del espesor de la capa, incrementan el valor  $\sigma/R_f$  y suponen importantes reducciones de la vida en servicio del firme.

Por último, en base a todo el proceso investigador y cálculos realizados, se propone un catálogo de secciones de firme reciclado con cemento, cuyos espesores son:

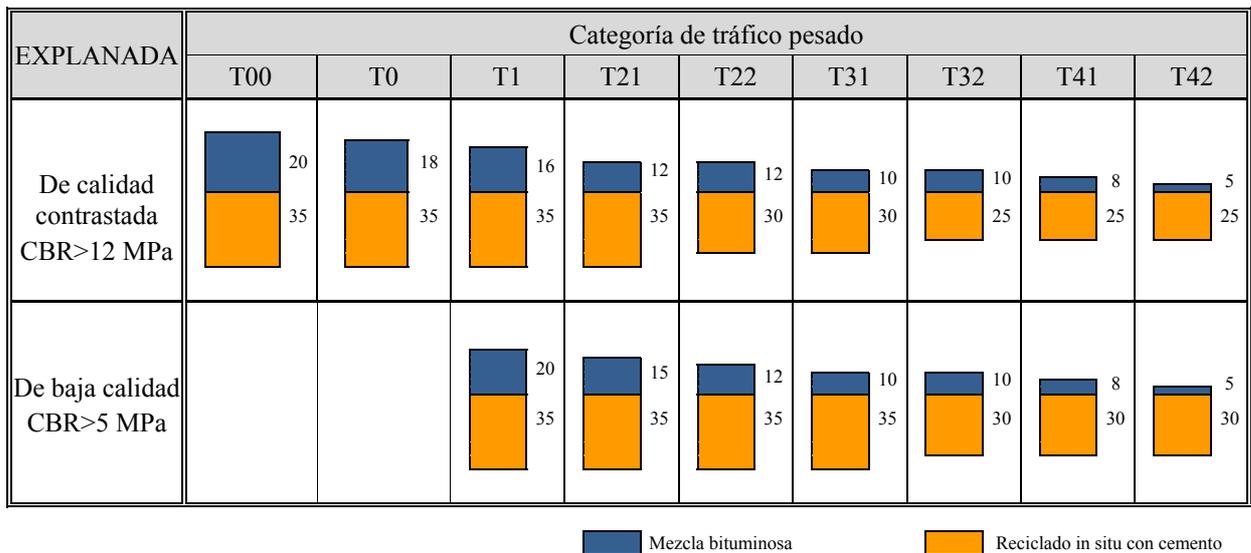


Figura 159. Propuesta de secciones de firme reciclado con cemento



---

## **CAPÍTULO 9**



## **BIBLIOGRAFÍA**



## **9. BIBLIOGRAFÍA**

- (1) Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento, Norma 6.1-IC, Secciones de Firme y Capas Estructurales de Firmes, Orden FOM/3460/2003 de 28 de noviembre. Madrid, 2003.
- (2) Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento, Norma 6.3-IC, Rehabilitación de firmes, Orden FOM/3459/2003, de 28 de noviembre. Madrid, 2003.
- (3) Díaz, J. Estabilización de suelos y reciclado de firmes, diseño y aspectos prácticos. Jornada técnica sobre los firmes de carretera. Consellería de Política Territorial, Obras Públicas e Transportes. Xunta de Galicia. Dirección Xeral de Obras Públicas. Santiago de Compostela, marzo de 2008.
- (4) López-Bachiller, M. Estado de la técnica de estabilizaciones y reciclados en España en mayo de 2006. VII congreso Nacional de Firmes. Junta de Castilla y León, AEC. Ávila, mayo de 2006.
- (5) Comisión Permanente del Cemento, Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento, Instrucción para la recepción de cementos RC-08, Real Decreto 986/2008 de 6 junio. BOE de 19 de junio de 2008.
- (6) Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales PG-4, Capítulo 21: Reciclado in situ con cemento de capas de firmes. O.C. 8/2001, de 28 de diciembre. Madrid, 2001.
- (7) Dirección General de Carreteras e Infraestructuras. Consejería de Fomento, Junta de Castilla y León. Recomendaciones de proyecto y construcción de firmes y pavimentos, Valladolid, 2004.
- (8) Jofré, C., Kraemer, C. y Díaz, J. Manual de firmes reciclados in situ con cemento, Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones, IECA. Madrid, 1999.
- (9) Collings, D.C. Experiences gained from ten years of pavement rehabilitation by in situ recycling with cement and combinations of cement/bituminous stabilising. Proceedings, First International Symposium on Subgrade Stabilisation and In Situ Pavement Recycling using Cement. Ministerio de Fomento, Junta de Castilla y León, IECA, AEC y ATC. Salamanca, octubre de 2001.
- (10) Milton, L.J. y Earland, M. Design guide and Specifications for structural maintenance of highway pavements by cold in-situ recycling. Transport Research Laboratory TRL, Report 386. Crowthorne, Inglaterra, 2000.

- (11) Kraemer, C., Pardillo, J.M., Rochi, S., Romana, M., Sánchez, V. y del Val, M.A. Ingeniería de Carreteras, Volumen II. Editorial Mc Graw Hill. Madrid, 2004.
- (12) Díaz, J. The state of the art on site pavement recycling with cement in Spain. 2<sup>nd</sup> International Symposium Treatment and Recycling of Materials for Transport Infrastructure, TREMTI. París, octubre de 2005.
- (13) Díaz, J. Reciclado de firmes in situ con cemento, Universidad Politécnica de Burgos, departamento de ingeniería civil, apuntes publicados de clase. Burgos, 2010.
- (14) Technical committee 7/8: Road Pavements. Cold in-place recycling of pavements with cement, final report. Association Mondiale de la Route – AIPCR, World Road Association – PIARC, December 2002.
- (15) Díaz, J. Reciclado de firmes in situ con cement. Tratamento de Materiais com Cal e/ou Cimento para Infra-Estructuras de transporte, TRATCICA. Oporto, junio de 2008.
- (16) Córdova, E. y Cárcamo, M. Reciclado con cemento de pavimentos flexibles en El Salvador. 3<sup>er</sup> Simposio Internacional de tratamiento y reciclado de materiales para obras de infraestructura de transporte TREMTI. Antigua Guatemala, noviembre de 2009.
- (17) Kanno, Y., Kurokawa, T. y Marushima, T. Application of cement and asphalt emulsion to in situ recycling base course method. Proceedings, First International Symposium on Subgrade Stabilisation and In Situ Pavement Recycling using Cement. Ministerio de Fomento, Junta de Castilla y León, IECA, AEC y ATC. Salamanca, octubre de 2001.
- (18) Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) e Instituto Español del Cemento y sus aplicaciones (IECA), Manual de firmes con capas tratadas con cemento. Madrid, 2003.
- (19) Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento, Norma 6.1, firmes flexibles y Norma 6.2 IC, firmes rígidos, O.M. de 23-5-89, BOE de 30 de junio de 1989.
- (20) Consejería de Obras Públicas y Transporte, Junta de Andalucía, Instrucción para el diseño de Firmes de la red de carreteras de Andalucía. Sevilla, 2007.
- (21) Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Normas UNE-EN y normas UNE de ensayos de carreteras. Norma UNE 103501. Geotecnia. Ensayo de compactación. Proctor modificado. 1994.
- (22) Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Normas UNE-EN y normas UNE de ensayos de carreteras. Norma UNE 41240. Materiales tratados con conglomerantes hidráulicos. Métodos de ensayo. Determinación del plazo de trabajabilidad. 2003.

- (23) Wirtgen. Recuperación del pavimento flexible con cemento portland, un esquema mundial en las vías terrestres. Retrospectiva y casos de éxito en México. 3<sup>er</sup> Simposio Internacional de tratamiento y reciclado de materiales para obras de infraestructura de transporte TREMTI. Antigua Guatemala, noviembre de 2009.
- (24) Jofré, C. An overview of modern equipment for subgrade stabilisation and in situ pavement recycling with cement. Proceedings, First International Symposium on Subgrade Stabilisation and In Situ Pavement Recycling using Cement. Ministerio de Fomento, Junta de Castilla y León, IECA, AEC y ATC. Salamanca, octubre de 2001.
- (25) Wirtgen Cold Recycling Manual. Wirtgen GmbH, Windhagen (Germany), November 1998.
- (26) Díaz, J. Estabilización de suelo y reciclado de firmes in situ con cemento. Problemática en obra. Jornada sobre estabilización de explanadas. Aspectos técnicos. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, demarcación de Castilla y León. Valladolid, mayo de 2007.
- (27) López-Bachiller, M. Estabilización de suelos y reciclado de carreteras. Algunos aspectos prácticos. Jornadas sobre mezclas con cemento. Intevía. Madrid, enero de 2003.
- (28) Díaz, J. Precracking of cement-treated layers in Spain. 2<sup>nd</sup> International Symposium Treatment and Recycling of Materials for Transport Infrastructure, TREMTI. París, octubre de 2005.
- (29) Díaz, J. Suelocemento: diseño y construcción, criterios para evitar fallos. Jornada sobre el diseño de firmes y criterios en la ejecución de las secciones de suelocemento. Departamento de infraestructuras viarias de la Dirección General de Carreteras. Diputación Foral de Guipúzcoa. San Sebastián, abril de 2008.
- (30) Díaz, J. El reciclado con cemento en las vías de baja intensidad de tráfico. Aplicación a la red de carreteras de la Junta de Castilla y León (España). Proceedings, First International Symposium on Subgrade Stabilisation and In Situ Pavement Recycling using Cement. Ministerio de Fomento, Junta de Castilla y León, IECA, AEC y ATC. Salamanca, octubre de 2001.
- (31) Peña Suárez, Juan, Retratamiento con cemento de firmes existentes, IV Jornadas sobre Pavimentos de Hormigón, ATC, IECA, Ministerio de Fomento y Principado de Asturias. Oviedo, Septiembre – Octubre de 1993.
- (32) Diaz, J. The state of the art of in situ pavement recycling with cement in Spain. 9<sup>o</sup> Internacional Symposium on Concrete Roads. AIPCR (PIARC), CEMBUREAU, TCMB. Turquía (Estambul), abril de 2004.

- (33) Jofré, C. Firmes reciclados in situ con cemento. Jornadas sobre mezclas con cemento en explanadas y firmes. Intevía. Madrid, 2004.
- (34) López-Bachiller, M. Estudio del coste de las unidades de estabilización de explanadas y reciclado in situ con cemento. Proceedings, First International Symposium on Subgrade Stabilisation and In Situ Pavement Recycling using Cement. Ministerio de Fomento, Junta de Castilla y León, IECA – AEC – ATC. Salamanca, octubre de 2001.
- (35) López-Bachiller, M. El coste de los errores de las obras mal ejecutadas. Reciclado de firmes, estado actual de la técnica. Intevía. Madrid, enero de 2007.
- (36) Koliás, S., Katsakou, M. y Kaloidas, V. Mechanical properties of flexible pavement materials recycled with cement. Proceedings, First International Symposium on Subgrade Stabilisation and In Situ Pavement Recycling using Cement. Ministerio de Fomento, Junta de Castilla y León, IECA – AEC – ATC. Salamanca, octubre de 2001.
- (37) Koliás, S. y Jouni, R. Mechanical properties of mixture of milled bituminous materials and crushed aggregates recycled with bitumen emulsion and cement. 2<sup>nd</sup> International Symposium Treatment and Recycling of Materials for Transport Infrastructure, TREMTI. París, octubre de 2005.
- (38) Moreira, P., Simoes, R., Peresca, P. y Gomes, A. Recycling of bituminous pavement with Pórtland cement – Portugalis experiences and advances. 2<sup>nd</sup> International Symposium Treatment and Recycling of Materials for Transport Infrastructure, TREMTI. París, octubre de 2005.
- (39) Abdo, J., Christory, J. y Sicard, D. Recycling of milled asphalt concrete as aggregate of road cement concrete. 2<sup>nd</sup> International Symposium Treatment and Recycling of Materials for Transport Infrastructure, TREMTI. París, octubre de 2005.
- (40) Koliás, S., Katsakou, M., Karaholios, A. y Kirkili, E. The influence of the milled bituminous material content on the mechanical properties of cement recycled flexible pavement materials. 2<sup>nd</sup> International Symposium Treatment and Recycling of Materials for Transport Infrastructure, TREMTI. París, octubre de 2005.
- (41) Vorobieff, G. Australian experiences on subgrade stabilisation and pavement recycling. Proceedings, First International Symposium on Subgrade Stabilisation and In Situ Pavement Recycling using Cement. Ministerio de Fomento, Junta de Castilla y León, IECA – AEC – ATC. Salamanca, octubre de 2001.
- (42) Rossberg, K. In situ pavement recycling using cement and bitumen combined as binder-strength parameters and long-term performance. Proceedings, First International Symposium on Subgrade Stabilisation and In Situ Pavement Recycling using Cement. Ministerio de Fomento, Junta de Castilla y León, IECA – AEC – ATC. Salamanca, octubre de 2001.

- (43) Houben, L. Fatigue characterisation of recycled asphalt stabilised with bitumen – emulsion and cement. Proceedings, First International Symposium on Subgrade Stabilisation and In Situ Pavement Recycling using Cement. Ministerio de Fomento, Junta de Castilla y León, IECA – AEC – ATC. Salamanca, octubre de 2001.
- (44) Garnica, P., Pérez, N. y Perez, A. Fatigue test on a lime stabilized soil. 3<sup>er</sup> Simposio Internacional de tratamiento y reciclado de materiales para obras de infraestructura de transporte TREMTI. Antigua Guatemala, noviembre de 2009.
- (45) Yoshida, T. and Noda, E. Technical guidelines for in situ recycling of base course in Japan. Proceedings, First International Symposium on Subgrade Stabilisation and In Situ Pavement Recycling using Cement. Ministerio de Fomento, Junta de Castilla y León, IECA – AEC – ATC. Salamanca, octubre de 2001.
- (46) Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Ministerio de Fomento. Estudio de testigos. Tramo Cañaverl Sur – Límite de Provincia de Salamanca, N-630. Propiedad de la Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento. Abril de 1996.
- (47) Blanco Segarra, José Manuel, Experiencia de reciclado con cemento en la obra realizada en la carretera N-630 de Gijón al Puerto de Sevilla. Tramo: Límite Provincia de Salamanca – Cañaverl (sur). Provincia de Cáceres, VI Jornadas de Conservación de Carreteras, ATC, Ministerio de Fomento y Comunidad de la Región de Murcia. Murcia, junio de 1997.
- (48) CEDEX. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento. Normas NLT de ensayo de carreteras. Norma NLT-349/90 medida de módulos dinámicos de materiales para carreteras. Madrid, 1990.
- (49) CEDEX. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento. Normas NLT de ensayo de carreteras. Norma NLT-305/90 resistencia a compresión simple de materiales tratados con conglomerantes hidráulicos. Madrid, 1990.
- (50) Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales PG-3, capítulo 513, materiales tratados con cemento (suelocemento y gravacemento). Orden FOM/891/04. Madrid, 2004.
- (51) Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Normas UNE-EN y normas UNE de ensayos de carreteras. Norma UNE 103103. Determinación del límite líquido de un suelo por el método de aparato de Casagrande. 1994.
- (52) Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Normas UNE-EN y normas UNE de ensayos de carreteras. Norma UNE 103104. Determinación del límite plástico de un suelo. 1993.

- (53) Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Normas UNE-EN y normas UNE de ensayos de carreteras. Norma UNE 933-8. Ensayo para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena. 2000.
- (54) Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Normas UNE-EN y normas UNE de ensayos de carreteras. Norma UNE 103204. Determinación del contenido de materia orgánica oxidable de un suelo por el método del permangatao potásico. 1993.
- (55) Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Normas UNE-EN y normas UNE de ensayos de carreteras. Norma UNE 103201. Determinación cuantitativa del contenido en sulfatos de un suelo. 1996.
- (56) Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Normas UNE-EN y normas UNE de ensayos de carreteras. Norma UNE-EN ISO 9001. Sistemas de gestión de la calidad. Requisitos. 2008.
- (57) Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Normas UNE-EN y normas UNE de ensayos de carreteras. Norma UNE-EN 12390-2. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2. Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia. 2009.
- (58) Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Normas UNE-EN y normas UNE de ensayos de carreteras. Norma UNE-EN 12390-3. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3. Determinación de la resistencia a compresión de probetas. 2009.
- (59) Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Normas UNE-EN y normas UNE de ensayos de carreteras. Norma UNE-EN 12390-4. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 4: Resistencia a compresión. Características de las máquinas de ensayo. 2001.
- (60) CEDEX. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento. Normas NLT de ensayo de carreteras. Norma NLT-310/90 compactación con martillo vibrante de materiales granulares tratados. Madrid, 1990.
- (61) CEDEX. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento. Resolución de 22 de octubre de 2009 por la que se fijan los precios públicos que han de regir las prestaciones de servicios. BOE número 282 de 23 de noviembre de 2009.
- (62) Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Normas UNE-EN y normas UNE de ensayos de carreteras. Norma UNE-EN 12390-6. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6. Resistencia a tracción indirecta de probetas. 2010.

- (63) CEDEX. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento. Normas NLT de ensayo de carreteras. Norma NLT-304/89 resistencia a compresión diametral de materiales tratados con conglomerantes hidráulicos. Madrid, 1989.
- (64) Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Normas UNE-EN y normas UNE de ensayos de carreteras. Norma UNE-EN 12390-5. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas. 2009.
- (65) ASTM Standards worldwide. American Society for Testing and Materials. C469-94. Standard test method of static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression. EEUU, 2004.
- (66) NMX-C-128-1997. Determinación del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson. Normas mexicanas. Dirección General de Normas. Mexico 1997.
- (67) López Agüí, J.C., Garrido, A. y otros. Control Estadístico del Hormigón Estructural, Monografía M-7, Comisión 2 Materiales del Grupo de Trabajo 2/4, Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural ACHE. Madrid, junio de 2003.
- (68) Williams, R.I.T. y Kolias, S. Estimation of the modulus of elasticity of cement stabilised materials. Geotechnical Testing Journal, FTJODJ, Vol, 7 nº1. United Kingdom, 1991.
- (69) Williams, R.I.T. y Kolias, S. Cement-bound road materials: strength and elastic properties measured in the laboratory. TRRL supplementary report 344, transport and road research laboratory. Crowthorn, United Kingdom, 1978.
- (70) Solís, L.A., Ruiz, A. y Díaz, J. Auscultación de firmes construidos con suelocemento. Revista Carreteras. Nº 130 AEC. Madrid, noviembre – diciembre de 2003.
- (71) Solís, L.A. y Díaz, J. Los firmes con suelocemento en la red autonómica de Castilla y León. Revista Cemento y Hormigón nº 835. Madrid, abril de 2002.
- (72) Departamento de transportes y obras públicas. Gobierno Vasco. Normas para el dimensionamiento de firmes de la red de carreteras del País Vasco. Vitoria, 2006.
- (73) Consellería d'Infraestructures i transport. Generalitat Valenciana. Norma de secciones de firme de la Comunitat Valenciana. Valencia, 2009.
- (74) Jofré, C. y Vaquero, J. Manual de pavimentos industriales. Instituto español del cemento y sus aplicaciones IECA. Madrid, 2002.
- (75) Comisión Permanente del Hormigón, Secretaría general Técnica, Ministerio de Fomento, Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 aprobada por Real Decreto 1247/2008 de 18 julio, BOE 203 de 22 de agosto de 2008.

- (76) Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes. Conception et dimensionnement des structures de chaussée. Guide technique. Paris, 1994.
- (77) Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement. Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'île de France. Catalogue des structures de chaussées. Paris, 2003.
- (78) Ruiz, A. Dimensionamiento de secciones de firme con base de suelocemento para las categorías de tráfico T00 y T0. Jornada sobre el diseño de firmes y criterios en la ejecución de las secciones de suelocemento. Departamento de infraestructuras viarias de la Dirección General de Carreteras. Diputación Foral de Guipúzcoa. San Sebastián, abril de 2008.
- (79) Ministerio del Interior. Reglamento general de vehículos. Anexo IX, masas y dimensiones. Real Decreto 2822/1998 de 23 de diciembre con correcciones en Orden PRE/3298/2004 de 13 de octubre y Orden PRE/52/2010 de 21 de enero.
- (80) Kraemer, C. Albelda R. Evaluación técnico – económica de las secciones de firme de la Norma 6.1-IC. IV Congreso Nacional de Firmes, Normalización e Innovación. Junta de Castilla y León y AEC. León, 2004.
- (81) Burmister D.M. The general theory of stresses and. Proceedings HRB. 1954.
- (82) Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento, Pliego de prescripciones técnicas generales PG-3. Capítulo 542 mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso y capítulo 543 mezclas bituminosas para capa de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas. Orden 24/2008 de 30 de julio. Madrid, 2008.
- (83) Del Val, M. Las capas inferiores del firme en la nueva norma 6.1-IC. Novedades en pavimentos, firmes y explanadas. Intevía. Barcelona, 2003.
- (84) Koliás, S., Katsakou, M., Karaholios, A. y Kirkili, E. The influence of the milled bituminous material content on the mechanical properties of cement recycled flexible pavement materials. 2<sup>nd</sup> International Symposium Treatment and Recycling of Materials for Transport Infrastructure, TREMTI. París, octubre 2005.

---

## ANEJOS





---

## ANEJO 1



## FICHAS DOCUMENTALES DE LAS OBRAS REALIZADAS EN CASTILLA Y LEÓN



**TRAMO: AV-114 San Pedro del Arroyo – Muñico**

Provincia: Ávila

Fecha realización reciclado: 04/11/98 al 20/11/98

Tráfico (IMD/IMD pesados) en el año del reciclado (o del proyecto): 309 (22% pesados)

IMD/IMD pesados actual:

Longitud: 17,700 km (88.500 m<sup>2</sup>)

Ancho sección: 5,00 pavimentado sin arcenes ¿es ensanche?: no

Firme existente: 23-30 cm Macadam + Riego superficial

Firme construido: 30 cm reciclado + 5 cm MBF con betún modificado

Presupuesto (total y millones/km):

Contratista: PROBISA

Subcontratista reciclado:

Características reciclado:

- % cemento y tipo: 3,1% CEM II/B-V 32,5 R
- Ensayos previos: Granulometría y fórmula de trabajo

Preparación fórmula de trabajo

CEMENTO %	PROCTOR MODIFICADO		RESISTENCIA	
	Humedad óptima	Densidad Máxima	3 días	7 días
2	8,0	2,09	9,2	13,4
3	8,3	2,10	13,5	18,9
4	8,3	2,11	18,7	23,8

otros datos: - Plasticidad:

- Materia orgánica:

- Otros:

- Granulometría ensayos previos:

Tamices UNE	80	50	40	25	20	10	5	2	0,40	0,08
Firme existente (20 muestras)	100,0	69,3	52,9	28,2	25,9	19,0	16,9	14,7	6,8	3,2

- Granulometría después de reciclar:

- Proctor Modificado: Hopt = Dmáx =

- Resultados en obra:

R media 3/7 días = 14,5 / 19,4 kp/cm<sup>2</sup>

D in situ = 2,10 / Humedad 8,3%

- Otros ensayos:

Corrector granulométrico (tipo):

Equipos:

- Equipo de reciclado: 2 Fresadoras: Wirtgen WR 2.500 y Wirtgen 2.100 DCR con dosificadores WM-400 y WM-9000
- Equipo de compactación: Rodillo vibrante mixto

Proceso compactación:

Rendimiento medio - máximo = 800 m<sup>2</sup>/h

Riego de curado: ECR-1 extendido (tiempo):

Capa de Protección: sellado con arena

Apertura inmediata al tráfico: si

Período hasta paso del tráfico:

Período sin capa superior:

Riego de adherencia:

Características mezcla bituminosa (capas, tipo, % betún, ensayos control, etc):

Situación actual del firme:

Observaciones:

## TRAMO: AV-902 Navaluenga – Burgohondo

**Provincia:** Ávila

**Fecha realización reciclado:** 22/08/97 al 04/09/97

**Tráfico (IMD/IMD pesados) en el año del reciclado (o del proyecto):** 769 (6% pesados)

**IMD/IMD pesados actual:**

**Longitud:** 4,5 km (31.500 m<sup>2</sup>)

**Ancho sección:** 5,00 m pavimentado sin arcenes ¿es ensanche?: si, se ensancha a 7 m

**Firme existente:** 30 cm Macadam + Riego + 5 cm MBF

**Firme construido:** 30 cm Reciclado o suelocemento in situ + 8 cm MBC

**Presupuesto (total y millones/km):**

**Contratista:** COPROSA

**Subcontratista reciclado:**

**Características reciclado:**

- % cemento y tipo: 4% V-35 en calzada reciclada y 5% V-35 en suelocemento in situ
- Ensayos previos: Preparación fórmula de trabajo (suelo reciclado en ensanches)

CEMENTO %	PROCTOR MODIFICADO		RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )	
	Humedad óptima	Densidad Máxima	3 días	7 días
3	2,09	8,5	12,9	16,5
4	2,10	8,2	20,2	23,8
5	2,11	7,7	22,1	24,9
6	2,11	8,0	24,6	27,3

**otros datos:** - Plasticidad:

- Materia orgánica:

- Otros:

- Granulometría ensayos previos:

Tamices UNE	40	25	20	10	5	2	0,40	0,08
Suelo en ensanches			100,0	98,8	93,3	59,4	16,4	6,9

- Granulometría después de reciclar:

- Proctor Modificado: Hopt = 9,5% Dmáx = 1,94

- Resultados en obra: R media 3 / 7 / 28 días:

Calzada: 30,9 / 38,0 / 48,5 kp/cm<sup>2</sup>

Suelocemento ensanche: 18,6 / 20,7 / 29,0 kp/cm<sup>2</sup>

Banda calzada-ensanche: 28,4 / 32,7 / 44,1 kp/cm<sup>2</sup>

D in situ = 2,1 / Humedad 8,2%

- Otros ensayos:

**Corrector granulométrico (tipo):**

**Equipos:**

- Equipo de reciclado: Fresadora Wirtgen WG-2.500 + WM-400 (3 bandas/sección)
- Equipo de compactación: Rodillo vibrante mixto

**Proceso compactación:**

**Rendimiento medio/max:** 450 m<sup>2</sup>/hora

**Riego de curado:** ECR-1 extendido (tiempo):

**Capa de Protección:** sellado con gravilla

**Apertura inmediata al tráfico:** si

**Período hasta paso del tráfico:**

**Período sin capa superior:** --

**Riego de adherencia:**

**Características mezcla bituminosa (capas, tipo, % betún, ensayos control, etc):**

**Situación actual del firme:**

**Observaciones:** Se realizó previamente al reciclado el cajeo de ambas márgenes y relleno con jabre para la obtención de un suelocemento in situ con la misma maquinaria del reciclado

Reducción de deflexiones a los 3 meses de 150 a 73 (50% en valores medios)

**TRAMO: AV-941. Venta de Rasquilla (N-502) – Hoyos del Espino****Provincia:** Ávila**Fecha realización reciclado:** Septiembre 2005**Tráfico (IMD/IMD pesados) en el año del reciclado (o del proyecto):** 1333 / 79 (9%) → T41**IMD/IMD pesados actual:****Longitud:** 17,7 km (1,4 km reciclados)**Ancho sección:** 7 m                    ¿es ensanche?:**Firme existente:** 9-18 cm MBC + 15 cm Macadam (35 cm Zahorras en los arcenes ensanchados)**Firme construido:** 8 cm MBC + 35 cm reciclado (para renovar la ZA defectuosa)**Presupuesto (total y millones/km):****Contratista:** PROBISA**Subcontratista reciclado:** PROBISA**Características reciclado:**

- % cemento y tipo: 3,5 CEM IV/B 32,5 N
- Ensayos previos:

	% cemento	humedad	densidad	Resistencia 7 días
Proyecto	3	3,83	1,958	24,2
	4	3,59	1,971	29,1
	5	4,88	1,987	35,4
Tramo prueba JCL	3	3,5	2,02	25,1
	3,5	4,9	2,06	41,2
Tramo prueba IDC	3	4,4	2,06	30,0

**otros datos:** - Plasticidad: no

- Materia orgánica: no

- Otros:

- Granulometría ensayos previos:
- Granulometría después de reciclar:
- Proctor Modificado: Hopt = 4,4%            Dmáx = 2,00
- Resultados en obra:
  - R media 7 días =
  - D in situ: ≥ 100%                    (% Dmáx)
- Otros ensayos:
- Corrector granulométrico (tipo):

**Equipos:**

- Equipo de reciclado: Wirtgen WR 2500 y WM 1000
- Equipo de compactación:

**Proceso compactación:** 5 pasadas**Riego de curado:**                    extendido (tiempo):**Capa de Protección:****Apertura inmediata al tráfico (¿hay desvíos?):****Período hasta paso del tráfico:****Período sin capa superior:****Riego de adherencia:****Características mezcla bituminosa (capas, tipo, % betún, ensayos control, etc):****Situación actual del firme:****Observaciones:**

## TRAMO: Acceso al Arenal

**Provincia:** Ávila  
**Fecha realización reciclado:**  
**Tráfico (IMD/IMD pesados) en el año del reciclado (o del proyecto):** T42  
**IMD/IMD pesados actual:**  
**Longitud:** 11,440 km  
**Ancho sección:** 5                      ¿es ensanche?: no  
**Firme existente:** DTS + 12 cm arena + 15-20 piedra  
**Firme construido:** 5 cm MBC S-12 + 25 Reciclado (15 cm ZA aportada)  
**Presupuesto (total y millones/km):** 999.287,94 € 87.350,34 €/km

**Contratista:**  
**Subcontratista reciclado:**  
**Características reciclado:**

- % cemento y tipo: 5% CEM IV/B 32,5
- Ensayos previos:

% cemento	humedad	densidad	Resistencia 7 días

- otros datos: - Plasticidad: NP  
 - Materia orgánica:  
 - Otros: Eq. Arena 25 - 60

- Granulometría ensayos previos:

% pasa	10	0,40	0,080
	100	42-48	19-25

- Granulometría después de reciclar:
- Proctor Modificado: Hopt = 10,2                      Dmáx = 1,93
- Resultados en obra:  
 R media 7 días =  
 D in situ =                      (% Dmáx)
- Otros ensayos:
- Corrector granulométrico (tipo):

**Equipos:**

- Equipo de reciclado:
- Equipo de compactación:  
 Proceso compactación:

**Riego de curado:**                      extendido (tiempo):

**Capa de Protección:**

**Apertura inmediata al tráfico (¿hay desvíos?):**

**Período hasta paso del tráfico:**

**Período sin capa superior:**

**Riego de adherencia:**

**Características mezcla bituminosa (capas, tipo, % betún, ensayos control, etc):**

**Situación actual del firme:**

**Observaciones:**

**TRAMO: LE-126. ENCINEDO – LA BAÑA**

**Provincia:** LEON  
**Fecha realización reciclado:** AGOSTO 1.999  
**Tráfico (IMD/IMD pesados) en el año del reciclado (o del proyecto):** IMD (Año 1.999)= 335 IMDpes (Año 1.999)= 54  
**IMD/IMD pesados actual:** IMD (Año 2005)= 539 IMDpes (Año 2005)= 60  
**Longitud:** 6,4 Km.  
**Ancho sección:** 6 / 7                      **¿es ensanche?:** SI  
**Firme existente:** Muy Irregular, compuesto de: Macadam (espesor medio = 9-10 cms) + Aglomerado (espesor medio = 3-4 cms)  
**Firme construido:** 30 cms. de firme reciclado + 5 cms. de M.B.C. tipo S-20  
**Presupuesto (total y millones/km):** Presup. Adj. modificado = 2.335.692,69 Euros ; 0,365 mill. euros / km

**Contratista:** NECSO  
**Subcontratista reciclado:** PROBISA  
**Características reciclado:**

- **% cemento y tipo:** Del p.k. 4+950 al 6+280 un 4%. Resto del reciclado hasta p.k. 0+000 un 4,5%
- Tipo cemento = Cemento V-35
- **Ensayos previos:**

% cemento	% humedad	densidad	Resistencia 7 días
3	7,1	2,10	1,33
3	8,8	2,21	2,01
3	12,1	2,10	1,07
4	5,6	2,16	1,38
4	8,2	2,19	2,24
4	11,2	2,08	1,03
4,5	5,9	2,03	0,68
4,5	7,7	2,08	1,84
4,5	9,4	2,19	2,53
4,5	12,6	2,10	1,77
5	9,2	2,19	2,76
5	8,1	2,20	2,29
6	7,5	2,08	1,93
6	9,9	2,17	3,17
6	11,9	2,11	2,05

otros datos: - Plasticidad: 0<IP<5  
 - Materia orgánica: Entre 0 0,2%  
 - Otros:

- **Granulometría ensayos previos:**

Tamices UNE	80	63	50	32	25	20	12,5	10	6,3	5	2	0,63	0,4	0,16	0,08
% que pasa	100	100	100	93	90	87	79	74	65	59	45	32	26	19	15,0

- **Granulometría después de reciclar:**

Tamices UNE	80	63	50	32	25	20	12,5	10	6,3	5	2	0,63	0,4	0,16	0,08
% que pasa	100,0	100,0	100,0	100,0	91	90	85	83	79	77	72	66	61	50	41,0

- **Proctor Modificado:** Hopt = 9    Dmáx = 2,10
- **Resultados en obra:**
  - R media 7 días = 4% cemento 1,53 MPa. 4,5% cemento 1,70 MPa.
  - R media 28 días = 4% cemento 2,16 MPa. 4,5% cemento 2,24 MPa.
- **D in situ = 2,06    (% Dmáx) 98**
- **Otros ensayos:** -
- **Corrector granulométrico (tipo):** -



**TRAMO: CL-622: Santa María del Páramo – La Bañeza**

Provincia: León

Fecha realización reciclado: Agosto – septiembre de 2003

Tráfico (IMD/IMD pesados) en el año del reciclado (o del proyecto): 3.911 (15% = 590 v.p.); T22

IMD/IMD pesados actual:

Longitud: 12,260 km (11.510 m reciclados)

Ancho sección: 6/8,30 (ancho reciclado = 9,30 m) ¿es ensanche?: si, con suelo seleccionado

Firme existente: 10-12 cm mezclas bituminosas + 14-30 cm macadam + suelo algo plástico

Firme construido: (18cm MBC + 25 cm ZA + 25 cm ZN) → 12 cm MBC + 35 cm reciclado (30 cm reales)

Presupuesto (total y millones/km):

Contratista: SIERRA

Subcontratista reciclado: SIERRA

Características reciclado:

- % cemento y tipo: 4% CEM II/B-M 32,5 R
- Ensayos previos:

	% cemento	humedad	densidad	Resistencia 7 días	
ENSAYOS PREVIOS					
Calzada	3,5 %	CEM II/B-M 32,5 R	6,7	2,10	19,6
	4%		6,8	2,12	25,9
	3%	ESP VI-1 32,5 N	8,1	2,10	16,8
4%	8,1		2,12	20,6	
Ensanche	3%	ESP VI-1 32,5 N	6,8	2,27	18,9
	4%		6,6	2,28	23,9
	5%		6,2	2,30	28,8
TRAMO DE PRUEBA					
Calzada	3,5%	CEM II/B-M 32,5 R	7,5	2,11	48,4 <sup>(*)</sup>
	4%		8,9	2,14	60,0
Ensanche	3,5%	CEM II/B-M 32,5 R	6,8	2,14	21,1 <sup>(*)</sup>
	4%		6,4	2,10	37,8

(\*) poco fiable la dosificación. Sobredosificado por tramo de prueba

otros datos: - Plasticidad:

	LL	IP
Calzada	16-28	3-10
Ensanche	14-15	2-3

- Materia orgánica: no

- Otros:

- Granulometría ensayos previos:

Tamiz	100	80	63	50	40	25	20	10	5	2	0,4	0,08
Calzada	100	85-100	85-92	84-92	83-86	67-79	63-77	48-68	18-56	15-50	11-42	6-28
Préstamo ensanche		100	80-87	79-87	70-75	52-65	44-52	24-36	16-23	13-18	7-11	4-7

- Granulometría después de reciclar:

- Proctor Modificado: Hopt = 6,6% Dmáx = 2,17

- Resultados en obra:

R media 7 días = Calzada = 20,8 a 47,7 Ensanche = 17 a 39

D in situ = 97,5 a 102 % (% Dmáx): Salvo algunas zonas de mucha humedad

- Otros ensayos:

- Corrector granulométrico (tipo): no

Equipos:

- Equipo de reciclado: 2 equipos WR 2500 y WM 1000 (salvo varios días en polvo con Panien)
- Equipo de compactación: Rodillo liso HAM 24 t

Proceso compactación:

Riego de curado: emulsión extendido (tiempo): a medio día y noche

Capa de Protección:

Apertura inmediata al tráfico (¿hay desvíos?): No, hay corte de carretera

Período hasta paso del tráfico: 1 mes

Período sin capa superior: 10-20 días

**Equipos:**

- **Equipo de reciclado:** Recicladora Wirtgen WR2500S y Distribuidor de lechada Wirtgen WM1000
- **Equipo de compactación:** Rodillo compactación Lebrero 155TT
- **Equipo de extendido:** Motoniveladora Caterpillar 12G

**Proceso compactación:** Compactación con el rodillo las pasadas necesarias hasta conseguir el 98% del próctor normal.

**Riego de curado:** ECR **extendido (tiempo):** Camión bituminador en aproximadamente dos horas de compactar

**Capa de Protección:** Gravilla

**Apertura inmediata al tráfico (¿hay desvíos?):** Si

**Período hasta paso del tráfico:** -

**Período sin capa superior:** 20 días

**Riego de adherencia:** ECR

**Características mezcla bituminosa (capas, tipo, % betún, ensayos control, etc):**

Capa	Tipo	% Betún	Ensayos Control
Rodadura	M.B.C. S-20	4,3 %	1/500 Ton.

**Situación actual del firme:** Estado aceptable excepto actuaciones puntuales que han deteriorado la regularidad.

**Observaciones:**

**TRAMO: P-944, de Frechilla (cruce con P-924) a cruce con P-953**

Provincia: PALENCIA  
 Fecha realización reciclado: AGOSTO 1999  
 Tráfico (IMD/IMD pesados) en el año del reciclado (o del proyecto):  
 IMD/IMD pesados actual:  
 Longitud: 6.400 METROS  
 Ancho sección: 6,00                      ¿es ensanche?:  
 Firme existente: MACADAM CON TRATAMIENTO SUPERFICIAL ASFÁLTICO  
 Firme construido: 5 CM AF-12 + 30 CM RECICLADO  
 Presupuesto (total y millones/km):

Contratista: ZARZUELA ECSA  
 Subcontratista reciclado: ¿ASFALTECNICA?  
 Características reciclado:
 

- % cemento y tipo: 3,50% CEM IV/B 32,5
- Ensayos previos:

% cemento	humedad	densidad	Resistencia 7 días

otros datos: - Plasticidad:  
                   - Materia orgánica:  
                   - Otros:

- Granulometría ensayos previos:
- Granulometría después de reciclar:
- Proctor Modificado: Hopt =            Dmáx =
- Resultados en obra:  
     R media 7 días =  
     D in situ =                      (% Dmáx)
- Otros ensayos:
- Corrector granulométrico (tipo):

Equipos:

- Equipo de reciclado: WIRTGEN 2500 + WM 400
- Equipo de compactación: HAMM 2620 D DE 19,5 TN

Proceso compactación:

Riego de curado: ECR-1    extendido (tiempo): MEDIODIA Y TARDE

Capa de Protección: NO

Apertura inmediata al tráfico (¿hay desvíos?): NO / ITINERARIO ALTERNATIVO

Período hasta paso del tráfico: 30 DÍAS

Período sin capa superior: 15 DÍAS

Riego de adherencia: ECR-1

Características mezcla bituminosa (capas, tipo, % betún, ensayos control, etc):  
 5 CM AF-12

Situación actual del firme: BUENA

Observaciones: ESTA CARRETERA HA TENIDO POSTERIORES TRATAMIENTOS DE SANEAMIENTO DE FIRME Y DOS CAPAS DE M.B.C. TIPO S-20 Y S-12

Riego de adherencia: Termoadherente

Características mezcla bituminosa (capas, tipo, % betún, ensayos control, etc):

Tipo	Espesor	% betún s/áridos	% huecos mezcla	% huecos áridos	Estabilidad	Deformación	Filler/betún
G-20	5,5 + 2,9	3,7 - 5,3	5 - 7	15 - 17	14 - 19	2,5 - 3	0,48 - 1,1
S-12	5,0	4,7 - 5,6	4,4 - 7	16 - 18	14 - 21	2,5 - 3	0,8 - 1,2

Situación actual del firme: Buen estado

Observaciones:

IRI	< 1,5	< 2	< 2,5	Media	D. típica
Stª María - La Bañeza	87%	94%	97%	1,2	0,4
La Bañeza - Stª María	86%	96%	96%	1,2	0,5

**TRAMO: P-940, de Mazariegos a Fuentes de Nava (int. P-953)**

Provincia: PALENCIA

Fecha realización reciclado: SEPTIEMBRE-OCTUBRE 2000

Tráfico (IMD/IMD pesados) en el año del reciclado (o del proyecto):

IMD/IMD pesados actual:

Longitud: 8.400 METROS

Ancho sección: 5,50 ¿es ensanche?:

Firme existente: MACADAM CON TRATAMIENTO SUPERFICIAL ASFÁLTICO

Firme construido: 5 CM S-12 + 20 CM RECICLADO

Presupuesto (total y millones/km):

Contratista: PROBISA

Subcontratista reciclado: PROBISA

Características reciclado:

- % cemento y tipo: 3,00% CEM IV/B 32,5

- Ensayos previos:

% cemento	humedad	densidad	Resistencia 7 días
3	7,3	2,13	21,5 Kp/cm <sup>2</sup>
4	7,3	2,12	26,5 Kp/cm <sup>2</sup>
5	6,9	2,13	31,8 Kp/cm <sup>2</sup>

otros datos: - Plasticidad: Ll = 18,5 Lp = 13,4 lp = 5,1

- Materia orgánica: 1,6

- Otros: sulfatos = 0,01

- Granulometría ensayos previos:

Tamiz UNE	80	50	40	25	20	10	5	2	0,40	0,08
%	100	94,6	88,6	75,9	68,5	54,1	41,9	36,1	26,4	16

- Granulometría después de reciclar:

Tamiz UNE	80	50	40	25	20	10	5	2	0,40	0,08
%	100	100	97,6	94	88,6	75,1	58,5	50,7	39,6	33,8

- Proctor Modificado: Hopt = 7,3 Dmáx = 2,12

- Resultados en obra:

R media 7 días = 19,6

D in situ = 1,98 (% Dmáx) = 93,2 H in situ = 8 (% Hopt) = 108

- Otros ensayos:

- Corrector granulométrico (tipo):

Equipos:

- Equipo de reciclado: WIRTGEN 2500 + WM 400

- Equipo de compactación: DYNAPAC DE 12 TN

Proceso compactación:

Riego de curado: ECR-1

extendido (tiempo): MEDIODIA Y TARDE

Capa de Protección: NO

Apertura inmediata al tráfico (¿hay desvíos?): NO / ITINERARIO ALTERNATIVO

Período hasta paso del tráfico: 30 DÍAS

Período sin capa superior: 15 DÍAS

Riego de adherencia: TERMOADHERENTE

Características mezcla bituminosa (capas, tipo, % betún, ensayos control, etc):

5 CM S-12, 4,90% betún sobre mezcla, densidad = 2,39

Situación actual del firme: BUENA

Observaciones: ESTAN EMPEZANDO A APARECER FISURAS LONGITUDINALES (AÑO 2005)

**TRAMO: P-953, de Becerril de Campos a Fuentes de Nava (int. con P-940)**

Provincia: PALENCIA  
 Fecha realización reciclado: AGOSTO 1999  
 Tráfico (IMD/IMD pesados) en el año del reciclado (o del proyecto):  
 IMD/IMD pesados actual:  
 Longitud: 11.600 METROS  
 Ancho sección: 6,00                      ¿es ensanche?:  
 Firme existente: MACADAM CON TRATAMIENTO SUPERFICIAL ASFÁLTICO  
 Firme construido: 5 CM AF-12 + 30 CM RECICLADO  
 Presupuesto (total y millones/km):

Contratista: ZARZUELA ECSA  
 Subcontratista reciclado: ¿ASFALTECNICA?  
 Características reciclado:

- % cemento y tipo: 3,30% CEM IV/B 32,5
- Ensayos previos:

% cemento	humedad	densidad	Resistencia 7 días

otros datos: - Plasticidad:  
 - Materia orgánica:  
 - Otros:

- Granulometría ensayos previos:
- Granulometría después de reciclar:
- Proctor Modificado: Hopt =                      Dmáx =
- Resultados en obra:  
     R media 7 días =  
     D in situ =                      (% Dmáx)
- Otros ensayos:
- Corrector granulométrico (tipo):

Equipos:

- Equipo de reciclado: WIRTGEN 2500 + WM 400
- Equipo de compactación: HAMM 2620 D DE 19,5 TN

Proceso compactación:

Riego de curado: ECR-1    extendido (tiempo): MEDIODIA Y TARDE

Capa de Protección: NO

Apertura inmediata al tráfico (¿hay desvíos?): NO / ITINERARIO ALTERNATIVO

Período hasta paso del tráfico: 30 DÍAS

Período sin capa superior: 15 DÍAS

Riego de adherencia: ECR-1

Características mezcla bituminosa (capas, tipo, % betún, ensayos control, etc):

5 CM AF-12

Situación actual del firme: BUENA

Observaciones: ESTA CARRETERA HA TENIDO POSTERIORES TRATAMIENTOS DE SANEAMIENTO DE FIRME, REPOSICIÓN DE FIRME CON 5 CM DE M.B.C. TIPO S-12 Y LECHADA BITUMINOSA

**TRAMO: P-972, de CL-613 a Pozo de Urama**

Provincia: PALENCIA  
 Fecha realización reciclado: NOVIEMBRE 2000  
 Tráfico (IMD/IMD pesados) en el año del reciclado (o del proyecto):  
 IMD/IMD pesados actual:  
 Longitud: 4.900 METROS  
 Ancho sección: 5,40 ¿es ensanche?:  
 Firme existente: MACADAM CON TRATAMIENTO SUPERFICIAL ASFÁLTICO  
 Firme construido: 5 CM S-12 + 20 CM RECICLADO  
 Presupuesto (total y millones/km):

Contratista: PROBISA  
 Subcontratista reciclado: PROBISA  
 Características reciclado:

- % cemento y tipo: 3,00% CEM IV/B 32,5
- Ensayos previos:

% cemento	humedad	densidad	Resistencia 7 días
3	6,0	2,2	24,9 Kp/cm <sup>2</sup>
4	6,2	2,19	25,1 Kp/cm <sup>2</sup>
5	6,2	2,2	25,5 Kp/cm <sup>2</sup>

otros datos: - Plasticidad:

- Materia orgánica:

- Otros:

- Granulometría ensayos previos:
- Granulometría después de reciclar:
- Proctor Modificado: Hopt = 6,0 Dmáx = 2,20
- Resultados en obra:  
 R media 7 días = 35,6  
 D in situ = 2,09 (% Dmáx) = 94,9 H in situ = 5,50 (% Hopt) = 91,5
- Otros ensayos:
- Corrector granulométrico (tipo):

Equipos:

- Equipo de reciclado: WIRTGEN 2500 + WM 400
- Equipo de compactación: DYNAPAC DE 12 TN

Proceso compactación:

Riego de curado: ECR-1 extendido (tiempo): MEDIODIA Y TARDE

Capa de Protección: NO

Apertura inmediata al tráfico (¿hay desvíos?): NO / ITINERARIO ALTERNATIVO

Período hasta paso del tráfico: 20 DÍAS

Período sin capa superior: 10 DÍAS

Riego de adherencia: TERMOADHERENTE

Características mezcla bituminosa (capas, tipo, % betún, ensayos control, etc):

5 CM S-12, 4,65% betún s/mezcla, densidad 2,4

Situación actual del firme: BUENA

Observaciones:

**TRAMO: P-934, de P-905 a Guaza de Campos (int. P-924)**

Provincia: PALENCIA

Fecha realización reciclado: OCTUBRE 2000

Tráfico (IMD/IMD pesados) en el año del reciclado (o del proyecto):

IMD/IMD pesados actual:

Longitud: 8.900 METROS

Ancho sección: 5,20 ¿es ensanche?:

Firme existente: MACADAM CON TRATAMIENTO SUPERFICIAL ASFÁLTICO

Firme construido: 5 CM S-12 + 20 CM RECICLADO

Presupuesto (total y millones/km):

Contratista: PROBISA

Subcontratista reciclado: PROBISA

Características reciclado:

- % cemento y tipo: 3,25% CEM IV/B 32,5

- Ensayos previos:

% cemento	humedad	densidad	Resistencia 7 días
3	7,9	2,09	22,33 Kp/cm <sup>2</sup>
4	8,1	2,10	25,6 Kp/cm <sup>2</sup>
5	7,9	2,11	26,2 Kp/cm <sup>2</sup>

otros datos: - Plasticidad: LI = 22,93 Lp = 19,73 Ip = 3,2

- Materia orgánica: 1,18

- Otros: sulfatos = 0,3

- Granulometría ensayos previos:

Tamiz UNE	80	50	40	25	20	10	5	2	0,40	0,08
%	100	83,2	69,3	49,9	44,3	31,4	22,7	17,6	12	7,3

- Granulometría después de reciclar:

Tamiz UNE	80	50	40	25	20	10	5	2	0,40	0,08
%	100	91,4	85,9	74,1	67,1	47,8	34,9	27,7	18,4	15

- Proctor Modificado: Hopt = 7,9 Dmáx = 2,08

- Resultados en obra:

R media 7 días = 19,90

D in situ = 2,07 (% Dmáx) = 99,4 H in situ = 7,6 (% Hopt) = 96,1

- Otros ensayos:

- Corrector granulométrico (tipo):

Equipos:

- Equipo de reciclado: WIRTGEN 2500 + WM 400

- Equipo de compactación: DYNAPAC DE 12 TN

Proceso compactación:

Riego de curado: ECR-1 extendido (tiempo): MEDIODIA Y TARDE

Capa de Protección: NO

Apertura inmediata al tráfico (¿hay desvíos?): NO / ITINERARIO ALTERNATIVO

Período hasta paso del tráfico: 30 DÍAS

Período sin capa superior: 15 DÍAS

Riego de adherencia: TERMOADHERENTE

Características mezcla bituminosa (capas, tipo, % betún, ensayos control, etc):

5 CM S-12, 5% betún sobre mezcla, densidad = 2,37

Situación actual del firme: BUENA

Observaciones:

**TRAMO: P-963, de P-961 a Cervatos de la Cueva (int. N-120)**

Provincia: PALENCIA  
 Fecha realización reciclado: OCTUBRE-NOVIEMBRE 2000  
 Tráfico (IMD/IMD pesados) en el año del reciclado (o del proyecto):  
 IMD/IMD pesados actual:  
 Longitud: 15.880 METROS  
 Ancho sección: 5,40                      ¿es ensanche?:  
 Firme existente: MACADAM CON TRATAMIENTO SUPERFICIAL ASFÁLTICO  
 Firme construido: 5 CM S-12 + 20 CM RECICLADO  
 Presupuesto (total y millones/km):

Contratista: ASFALTOS NATURALES DE CAMPEZO

Subcontratista reciclado: PROBISA

Características reciclado:

- % cemento y tipo: 3,02% CEM IV/B 32,5
- Ensayos previos:

% cemento	humedad	densidad	Resistencia 7 días
3	6,3%	2,20	26,5 Kp/cm <sup>2</sup>
4	6,2%	2,21	35,5 Kp/cm <sup>2</sup>
5	6,0%	2,22	37,5 Kp/cm <sup>2</sup>

otros datos: - Plasticidad:

- Materia orgánica:

- Otros:

- Granulometría ensayos previos:
- Granulometría después de reciclar:
- Proctor Modificado: Hopt = 6,3              Dmáx =2,20
- Resultados en obra:  
 R media 7 días = 25,33  
 D in situ = 2,15              (% Dmáx) = 98,3%    Humedad in situ = 6,1    (%Hopt) = 96,6%
- Otros ensayos:
- Corrector granulométrico (tipo):

Equipos:

- Equipo de reciclado: WIRTGEN 2500 + WM 400
- Equipo de compactación: DYNAPAC DE 12 TN

Proceso compactación:

Riego de curado: ECR-1    extendido (tiempo): MEDIODIA Y TARDE

Capa de Protección: NO

Apertura inmediata al tráfico (¿hay desvíos?): NO / ITINERARIO ALTERNATIVO

Período hasta paso del tráfico:30 DÍAS

Período sin capa superior: 15 DÍAS

Riego de adherencia: TERMOADHERENTE

Características mezcla bituminosa (capas, tipo, % betún, ensayos control, etc):

5 CM S-12, 4,75% betún sobre mezcla, densidad 2,35 g/cm<sup>3</sup>

Situación actual del firme: BUENA

Observaciones:

**TRAMO: P-984, de N-611 a San Cebrián de Campos**

Provincia: PALENCIA  
 Fecha realización reciclado: NOVIEMBRE 2000  
 Tráfico (IMD/IMD pesados) en el año del reciclado (o del proyecto):  
 IMD/IMD pesados actual:  
 Longitud: 9.200 METROS  
 Ancho sección: 5,20                      ¿es ensanche?:  
 Firme existente: MACADAM CON TRATAMIENTO SUPERFICIAL ASFÁLTICO  
 Firme construido: 5 CM S-12 + 20 CM RECICLADO  
 Presupuesto (total y millones/km):

Contratista: PROBISA  
 Subcontratista reciclado: PROBISA  
 Características reciclado:

- % cemento y tipo: 3,13% CEM IV/B 32,5
- Ensayos previos:

% cemento	humedad	densidad	Resistencia 7 días
3	6,8	2,11	21 Kp/cm <sup>2</sup>
4	7	2,1	23,5 Kp/cm <sup>2</sup>
5	6,7	2,13	26,7 Kp/cm <sup>2</sup>

otros datos: - Plasticidad:  
 - Materia orgánica:  
 - Otros:

- Granulometría ensayos previos:
- Granulometría después de reciclar:
- Proctor Modificado: Hopt = 7,1                      Dmáx = 2,11
- Resultados en obra:  
     R media 7 días = 25,52  
     D in situ = 2,09                      (% Dmáx) = 99                      H in situ = 6,80                      (% Hopt) = 95,5
- Otros ensayos:
- Corrector granulométrico (tipo):

Equipos:

- Equipo de reciclado: WIRTGEN 2500 + WM 400
- Equipo de compactación: DYNAPAC DE 12 TN

Proceso compactación:

Riego de curado: ECR-1                                      extendido (tiempo): MEDIODIA Y TARDE  
 Capa de Protección: NO  
 Apertura inmediata al tráfico (¿hay desvíos?): NO / ITINERARIO ALTERNATIVO  
 Período hasta paso del tráfico: 30 DÍAS  
 Período sin capa superior: 15 DÍAS  
 Riego de adherencia: TERMOADHERENTE  
 Características mezcla bituminosa (capas, tipo, % betún, ensayos control, etc):  
 5 CM S-12, 4,60% betún sobre mezcla, densidad = 2,37  
 Situación actual del firme: BUENA  
 Observaciones:

**TRAMO: P-411, de Valdeolmillos (int. P-410) a Torquemada**

Provincia: PALENCIA  
 Fecha realización reciclado: NOVIEMBRE 2000  
 Tráfico (IMD/IMD pesados) en el año del reciclado (o del proyecto):  
 IMD/IMD pesados actual:  
 Longitud: 9.200 METROS  
 Ancho sección: 5,10                      ¿es ensanche?:  
 Firme existente: MACADAM CON TRATAMIENTO SUPERFICIAL ASFÁLTICO  
 Firme construido: 5 CM S-12 + 20 CM RECICLADO  
 Presupuesto (total y millones/km):

Contratista: ASFALTOS NATURALES DE CAMPEZO  
 Subcontratista reciclado: PROBISA  
 Características reciclado:

- % cemento y tipo: 5,33% CEM II/A-L 32,5
- Ensayos previos:

% cemento	humedad	densidad	Resistencia 7 días
4	8,2	2,03	17,3 Kp/cm <sup>2</sup>
5	8,3	2,03	21,0 Kp/cm <sup>2</sup>
6	8,0	2,05	22,1 Kp/cm <sup>2</sup>

otros datos: - Plasticidad:  
 - Materia orgánica:  
 - Otros:

- Granulometría ensayos previos:
- Granulometría después de reciclar:
- Proctor Modificado: Hopt = 8,2%              Dmáx = 2,03
- Resultados en obra:  
     R media 7 días = 28,44  
     D in situ = 2,08              (% Dmáx) = 102,36%      Hmedia = 8,73      (%Hmed) = 106,46
- Otros ensayos:
- Corrector granulométrico (tipo):

Equipos:

- Equipo de reciclado: WIRTGEN 2500 + WM 400
- Equipo de compactación: DYNAPAC DE 12 TN

Proceso compactación:

Riego de curado: ECR-1                                      extendido (tiempo): MEDIODIA Y TARDE  
 Capa de Protección: NO  
 Apertura inmediata al tráfico (¿hay desvíos?): NO / ITINERARIO ALTERNATIVO  
 Período hasta paso del tráfico: 30 DÍAS  
 Período sin capa superior: 15 DÍAS  
 Riego de adherencia: TERMOADHERENTE  
 Características mezcla bituminosa (capas, tipo, % betún, ensayos control, etc):  
 5 CM S-12, 4,96% de betún, densidad 2,39  
 Situación actual del firme: REGULAR  
 Observaciones:

**TRAMO: P-430, de P-405 a Valdespina (int. P-420)**

Provincia: PALENCIA  
 Fecha realización reciclado: NOVIEMBRE 2000  
 Tráfico (IMD/IMD pesados) en el año del reciclado (o del proyecto):  
 IMD/IMD pesados actual:  
 Longitud: 5.200 METROS  
 Ancho sección: 5,40                      ¿es ensanche?:  
 Firme existente: MACADAM CON TRATAMIENTO SUPERFICIAL ASFÁLTICO  
 Firme construido: 5 CM S-12 + 20 CM RECICLADO  
 Presupuesto (total y millones/km):

Contratista: ASFALTOS NATURALES DE CAMPEZO  
 Subcontratista reciclado: PROBISA  
 Características reciclado:

- % cemento y tipo: 3,20% CEM IV/B 32,5
- Ensayos previos:

% cemento	humedad	densidad	Resistencia 7 días
3	8,0	2,09	26,1 Kp/cm <sup>2</sup>
4	7,8	2,12	28,2 Kp/cm <sup>2</sup>
5	7,5	2,13	32,1 Kp/cm <sup>2</sup>

otros datos: - Plasticidad: LI = 26 Lp = 15,6 Ip = 10,4  
 - Materia orgánica: 1,2%  
 - Otros: sulfatos: 0,02%

- Granulometría ensayos previos:

Tamiz UNE	80	50	40	25	20	10	5	2	0,40	0,08
%	100,0	66,0	47,0	31,9	26,7	15,3	9,4	7,3	3,5	2,1

- Granulometría después de reciclar:

Tamiz UNE	80	50	40	25	20	10	5	2	0,40	0,08
%	100,0	88,1		77,9	67,6	50,3	37,7	28,5	16,6	12,8

- Proctor Modificado: Hopt = 8,0                      Dmáx = 2,09
- Resultados en obra:  
     R media 7 días = 28,23  
     D in situ = 2,07                      (% Dmáx) = 99,1    Humedad = 8,5    (% Hopt) = 106,2
- Otros ensayos:
- Corrector granulométrico (tipo):

Equipos:

- Equipo de reciclado: WIRTGEN 2500 + WM 400
- Equipo de compactación: DYNAPAC DE 12 TN

Proceso compactación:  
 Riego de curado: ECR-1                      extendido (tiempo): MEDIODIA Y TARDE  
 Capa de Protección: NO  
 Apertura inmediata al tráfico (¿hay desvíos?): NO / ITINERARIO ALTERNATIVO  
 Período hasta paso del tráfico: 30 DÍAS  
 Período sin capa superior: 15 DÍAS  
 Riego de adherencia: TERMOADHERENTE  
 Características mezcla bituminosa (capas, tipo, % betún, ensayos control, etc):  
 5 CM S-12, 4,72% betún, densidad 2,33  
 Situación actual del firme: BUENA  
 Observaciones:

**TRAMO: P-924, de Paredes de Nava a L.P. Valladolid**

Provincia: PALENCIA  
 Fecha realización reciclado: AGOSTO - SEPTIEMBRE 2001  
 Tráfico (IMD/IMD pesados) en el año del reciclado (o del proyecto):  
 IMD/IMD pesados actual:  
 Longitud: 21.000 METROS  
 Ancho sección: 5,15                      ¿es ensanche?:  
 Firme existente: MACADAM CON TRATAMIENTO SUPERFICIAL ASFÁLTICO  
 Firme construido: 5 CM S-12 + 20 CM RECICLADO  
 Presupuesto (total y millones/km):

Contratista: PROBISA  
 Subcontratista reciclado: PROBISA  
 Características reciclado:

- % cemento y tipo: 3,15% CEM IV/B 32,5
- Ensayos previos:

% cemento	humedad	densidad	Resistencia 7 días

otros datos: - Plasticidad:  
                   - Materia orgánica:  
                   - Otros:

- Granulometría ensayos previos:
- Granulometría después de reciclar:
- Proctor Modificado: Hopt =              Dmáx =
- Resultados en obra:  
     R media 7 días =  
     D in situ =                      (% Dmáx)
- Otros ensayos:
- Corrector granulométrico (tipo):

Equipos:

- Equipo de reciclado: WIRTGEN 2500 + WM 1000
- Equipo de compactación: DYNAPAC DE 12 TN

Proceso compactación:

Riego de curado: ECR-1                      extendido (tiempo): MEDIODIA Y TARDE

Capa de Protección: NO

Apertura inmediata al tráfico (¿hay desvíos?): NO / ITINERARIO ALTERNATIVO

Período hasta paso del tráfico: 30 DÍAS

Período sin capa superior: 15 DÍAS

Riego de adherencia: TERMOADHERENTE

Características mezcla bituminosa (capas, tipo, % betún, ensayos control, etc):  
 5 CM S-12

Situación actual del firme: REGULAR

Observaciones:

**TRAMO: P-921, Torremormojón – Ampudia y P-943 Ampudia – Valoria del Alcor**

Provincia: Palencia  
 Fecha realización reciclado:  
 Tráfico (IMD/IMD pesados) en el año del reciclado (o del proyecto): 134/33 (proyecto)  
 IMD/IMD pesados actual:  
 Longitud: 7,932 km  
 Ancho sección: 5,20 / 4,70                      ¿es ensanche?: No / Si (5,20)  
 Firme existente: Macadam con tratamiento superficial asfáltico  
 Firme construido: 5 cm MBC S-12 + 22 cm Reciclado  
 Presupuesto (total y millones/km): 106.391.327 pts    13,4 mill. Pts/km

Contratista: ASFALTOS NATURALES DE CAMPEZO  
 Subcontratista reciclado: PROBISA TECNOLOGÍA Y CONSTRUCCIÓN  
 Características reciclado:

- % cemento y tipo: 4% IV-B 32,5
- Ensayos previos:

% cemento	humedad	densidad	Resistencia 7 días
3	5-10	2-2,1	8-22
4	6-11	2,04-2,11	15-26
5	6,8-10,7	2-2,1	15-33

otros datos: - Plasticidad: 7,1  
 - Materia orgánica:  
 - Otros:

- Granulometría ensayos previos:
- Granulometría después de reciclar:

Tamiz	63	50	40	25	20	10	5	2	0,40	0,08
	100	75-92	72-88	49-66	42-62	27-50	18-37	15-34	15-26	11-20

- Proctor Modificado: Hopt = 8,1                      Dmáx = 2,10
- Resultados en obra:  
     R media 7 días =  
     D in situ =                      (% Dmáx)
- Otros ensayos:
- Corrector granulométrico (tipo):

Equipos:

- Equipo de reciclado: Wirtgen 2500 + WM1000
- Equipo de compactación: DYNAPAC 15 Tn

Proceso compactación:

Riego de curado: ECR-1                      extendido (tiempo): MEDIODÍA Y TARDE  
 Capa de Protección: NO  
 Apertura inmediata al tráfico (¿hay desvíos?): NO / ITINERARIO ALTERNATIVO  
 Período hasta paso del tráfico: 30 DÍAS  
 Período sin capa superior: 15 DÍAS  
 Riego de adherencia: EMULSIÓN TERMOADHERENTE  
 Características mezcla bituminosa (capas, tipo, % betún, ensayos control, etc):  
 RODADURA S-12, 1 CAPA DE 5 CM, 4,90% BETÚN  
 Situación actual del firme: BUEN ESTADO  
 Observaciones:

**TRAMO: P-931, de Villada a L.P. Valladolid**

Provincia: PALENCIA  
 Fecha realización reciclado: AGOSTO 2001  
 Tráfico (IMD/IMD pesados) en el año del reciclado (o del proyecto):  
 IMD/IMD pesados actual:  
 Longitud: 4.800 METROS  
 Ancho sección: 5,10                      ¿es ensanche?:  
 Firme existente: MACADAM CON TRATAMIENTO SUPERFICIAL ASFÁLTICO  
 Firme construido: 5 CM S-12 + 20 CM RECICLADO  
 Presupuesto (total y millones/km):

Contratista: PROBISA  
 Subcontratista reciclado: PROBISA  
 Características reciclado:

- % cemento y tipo: 3,20% CEM IV/B 32,5
- Ensayos previos:

% cemento	humedad	densidad	Resistencia 7 días

- otros datos:
- Plasticidad:
  - Materia orgánica:
  - Otros:

- Granulometría ensayos previos:
- Granulometría después de reciclar:
- Proctor Modificado: Hopt =              Dmáx =
- Resultados en obra:  
 R media 7 días =  
 D in situ =                      (% Dmáx)
- Otros ensayos:
- Corrector granulométrico (tipo):

Equipos:

- Equipo de reciclado: WIRTGEN 2500 + WM 1000
- Equipo de compactación: DYNAPAC DE 12 TN

Proceso compactación:

Riego de curado: ECR-1                      extendido (tiempo): MEDIODIA Y TARDE

Capa de Protección: NO

Apertura inmediata al tráfico (¿hay desvíos?): NO / ITINERARIO ALTERNATIVO

Período hasta paso del tráfico: 30 DÍAS

Período sin capa superior: 15 DÍAS

Riego de adherencia: TERMOADHERENTE

Características mezcla bituminosa (capas, tipo, % betún, ensayos control, etc):  
 5 CM S-12

Situación actual del firme: BUENA

Observaciones:

**TRAMO: P-941, de N-610 a P-953**

Provincia: PALENCIA  
 Fecha realización reciclado: AGOSTO 2001  
 Tráfico (IMD/IMD pesados) en el año del reciclado (o del proyecto):  
 IMD/IMD pesados actual:  
 Longitud: 5.300 METROS  
 Ancho sección: 5,20                      ¿es ensanche?:  
 Firme existente: MACADAM CON TRATAMIENTO SUPERFICIAL ASFÁLTICO  
 Firme construido: 5 CM S-12 + 20 CM RECICLADO  
 Presupuesto (total y millones/km):

Contratista: PROBISA  
 Subcontratista reciclado: PROBISA  
 Características reciclado:

- % cemento y tipo: 3,02% CEM IV/B 32,5
- Ensayos previos:

% cemento	humedad	densidad	Resistencia 7 días

otros datos: - Plasticidad:  
 - Materia orgánica:  
 - Otros:

- Granulometría ensayos previos:
- Granulometría después de reciclar:
- Proctor Modificado: Hopt =                      Dmáx =
- Resultados en obra:  
     R media 7 días =  
     D in situ =                      (% Dmáx)
- Otros ensayos:
- Corrector granulométrico (tipo):

Equipos:

- Equipo de reciclado: WIRTGEN 2500 + WM 1000
- Equipo de compactación: DYNAPAC DE 12 TN

Proceso compactación:

Riego de curado: ECR-1                                      extendido (tiempo): MEDIODIA Y TARDE  
 Capa de Protección: NO  
 Apertura inmediata al tráfico (¿hay desvíos?): NO / ITINERARIO ALTERNATIVO  
 Período hasta paso del tráfico: 30 DÍAS  
 Período sin capa superior: 15 DÍAS  
 Riego de adherencia: TERMOADHERENTE  
 Características mezcla bituminosa (capas, tipo, % betún, ensayos control, etc):  
 5 CM S-12  
 Situación actual del firme: BUENA  
 Observaciones:

**TRAMO: P-141, de int. P-143 a L.P. Burgos**

Provincia: PALENCIA  
 Fecha realización reciclado: MAYO 2004  
 Tráfico (IMD/IMD pesados) en el año del reciclado (o del proyecto):  
 IMD/IMD pesados actual:  
 Longitud: 9.223 METROS  
 Ancho sección: 5,00                      ¿es ensanche?:  
 Firme existente: SUELO CEMENTO Y MEZCLA BITUMINOSA EN CALIENTE  
 Firme construido: 5 CM S-12 + 22 CM RECICLADO  
 Presupuesto (total y millones/km):

Contratista: ZARZUELA ECSA  
 Subcontratista reciclado: SOLTEC  
 Características reciclado:

- % cemento y tipo: 3,76% CEM IV/B 32,5
- Ensayos previos:

% cemento	humedad	densidad	Resistencia 7 días

otros datos: - Plasticidad:  
                   - Materia orgánica:  
                   - Otros:

- Granulometría ensayos previos:
- Granulometría después de reciclar:
- Proctor Modificado: Hopt =              Dmáx =
- Resultados en obra:  
     R media 7 días =  
     D in situ =                      (% Dmáx)
- Otros ensayos:
- Corrector granulométrico (tipo):

Equipos:

- Equipo de reciclado: WIRTGEN 2500 + WM 1000
- Equipo de compactación: 2 LEBRERO DE 15 TN

Proceso compactación:

Riego de curado: ECR-1                      extendido (tiempo): MAÑANA Y TARDE

Capa de Protección: SI

Apertura inmediata al tráfico (¿hay desvíos?): SI / NO

Período hasta paso del tráfico: 8 HORAS

Período sin capa superior: 15 DÍAS

Riego de adherencia: TERMOADHERENTE

Características mezcla bituminosa (capas, tipo, % betún, ensayos control, etc):  
 5 CM S-12

Situación actual del firme: BUENA

Observaciones:

**TRAMO: P-405, de P.K. 24+250 A P.K. 27+585**

Provincia: PALENCIA  
 Fecha realización reciclado: NOVIEMBRE 2003  
 Tráfico (IMD/IMD pesados) en el año del reciclado (o del proyecto):  
 IMD/IMD pesados actual:  
 Longitud: 3.335 METROS  
 Ancho sección: 8,00                      ¿es ensanche?:  
 Firme existente: SUELO CEMENTO Y MEZCLA BITUMINOSA EN CALIENTE  
 Firme construido: 10 CM S-12 + 22 CM RECICLADO  
 Presupuesto (total y millones/km):

Contratista: HERGONSA  
 Subcontratista reciclado: HERGONSA  
 Características reciclado:

- % cemento y tipo: 3,20% CEM IV/B 32,5
- Ensayos previos:

% cemento	humedad	densidad	Resistencia 7 días

otros datos: - Plasticidad:  
                   - Materia orgánica:  
                   - Otros:

- Granulometría ensayos previos:
- Granulometría después de reciclar:
- Proctor Modificado: Hopt =                      Dmáx =
- Resultados en obra:  
     R media 7 días =  
     D in situ =                      (% Dmáx)
- Otros ensayos:
- Corrector granulométrico (tipo):

Equipos:

- Equipo de reciclado: WIRTGEN 2500 + WM 1000
- Equipo de compactación: DYNAPAC DE 12 TN

Proceso compactación:

Riego de curado: ECR-1                      extendido (tiempo): POR TRAMOS PARA ABRIR AL TRÁFICO

Capa de Protección: SI

Apertura inmediata al tráfico (¿hay desvíos?): SI / NO

Período hasta paso del tráfico: 3 A 4 HORAS

Período sin capa superior: 7 DÍAS

Riego de adherencia: TERMOADHERENTE

Características mezcla bituminosa (capas, tipo, % betún, ensayos control, etc):  
 5 CM S-20 + 5 CM S-12

Situación actual del firme: BUENA

Observaciones:

- **Otros ensayos:** - **Determinación capacidad soporte inmediata:** 48,2 a 61,4  
- **Plazo de manejabilidad:** 130 minutos
- **Corrector granulométrico (tipo):** No

**Equipos:**

- **Equipo de reciclado:** Wirtgen WR 2500 + WM 400
- **Equipo de compactación:** rodillo HAM de 17 T.

**Proceso compactación:** 1 pasada + motoniveladora + 3 pasadas vibrando.

**Riego de curado:** ECR-1 extendido (tiempo): por la mañana y noche (se mantiene húmeda la superficie)

**Capa de Protección:** Si, con gravilla 3-6

**Período hasta paso del tráfico:** inmediato (se barre muy bien al final del día)

**Apertura inmediata al tráfico:** Si

**Período sin capa superior:** 7-20 días

**Riego de adherencia:** emulsión termoadherente.

**Características mezcla bituminosa:** rodadura S-12 extendida en primavera 2002.  
base S-20 4,35 a 4,5% ligante

**Situación actual del firme:** muy buen estado

**Observaciones:**

Tanto la zahorra de los arcenes como el macadam central se reciclaron con un 5% de cemento ante la imposibilidad de dosificar valores diferentes. Por ello existe esa diferencia de resistencia entre ambos materiales

## TRAMO: CL-517. Vitigudino – La Fregeneda. Pk 66+770 a 110+150 (actuales)

Provincia: Salamanca  
 Fecha realización reciclado: 30/8/01 a 25/9/01 y 4/10/01 a –11/01  
 Tráfico (IMD/IMD pesados): Cuando se recicló actual

1984 (218)	T31 de pk 66+880 a 68+800 Vte de Vitigudino	2.513 (246)
874 (123)	T32 de pk 68+800 a 94+680 Vitigudino – Lumbrales	957 (119)
735 (63)	T41 de pk 94+680 a 110+150 Lumbrales – La Fregeneda	850 (69)

Longitud: 42,150 km (reciclados 19,200 km)  
 Tramos reciclados: Pk 66,880 a 67,270; de 67,610 a 69,650; de 72,800 a 78,300; de 82,250 a 83,650; de 88,000 a 90,000; de 100,350 a 101,200; de 102,800 a 110,150.

Ancho sección: 7/9 en 1.920 m y 6/8 el resto ¿es ensanche?: No.

Firme existente: Calzada 11-19 cm MBC + 11-20 cm Macadam  
 Arcenes. 10-12 cm MBC + 20-25 cm Zahorra Artificial contaminada

Firme proyectado: T31: 12 cm MBC + 30 cm reciclado 1  
 T32: 10 cm MBC + 30 cm reciclado 2  
 T41: 8 cm MBC + 30 cm reciclado 3

Presupuesto (millones/km): 681,6 millones de ptas (16,2 mill/km).

Contratista: UTE Hergonsa – Soltec  
 Subcontratista reciclado: Soltec  
 Características reciclado:

- % cemento y tipo: 5% CEM IV/B 32,5
- Ensayos previos:

	Dosificación de cemento	Humedad óptima	Densidad máxima	Resistencia (MPa)	Humedad a colocar en obra	Densidad a obtener	Resistencia esperada (MPa)
Reciclado nº 1. Variante de Vitigudino	4,5 %	6,0 %	2,14	2,6	6,0 %	2,14	2,6
Reciclados 2 y 3	Bandas laterales (Zahorra)	5 %	7,4 %	2,13	7,4 %	2,13	2,5
	Bandas laterales (Macadam)	5 %	6,0 %	2,15	7,4 %	2,12	3,0
	Bandas centrales (Macadam)	3,5 %	5,8 %	2,14	2,7		

otros datos: - Plasticidad: Macadam No Plástico  
 Zahorra LL ≈ 27, IP = 5 a 9.

- Materia orgánica: No
- Otros:
- Granulometría ensayos previos:

Tamiz UNE	80	50	40	25	20	10	5	2	0,40	0,080
Variante de Vitigudino. Reciclado 1. pk 67+100 y pk 68+480	100	91-94	80-86	65-72	60-67	39-42	25	17	7-8	4-5
Macadam del Reciclado 2. pk 76+680 y pk 82+295	100	91-100	77-97	64,8-83	59-77	39-51	27-33	21-24	12-13	5-7
Macadam del Reciclado 3. pk 98+180 y pk 105+300	100	94-100	88-96	78-85	72-78	50	33-34	22-24	9-11	4-6
Zahorra variantes y Reciclados 2 y 3. pk 93+120, pk 100+650 y pk 105+300	100	100	98	77-85	70-76	42-52	26-29	20	10-12	6-8

- Granulometría después de reciclar:
- Proctor Modificado: Hopt = 7,9 Dmáx = 2,06
- Resultados en obra:
  - R media 7 días = 17,5 a 22,6 kp/cm<sup>2</sup> en la zahorra (se adjunta valores de control)
  - 28,2 a 48,8 kp/cm<sup>2</sup> en el macadam
  - D in situ = 97 a 103 (% Dmáx)

**TRAMO: Tramo experimental SG-310 acceso a Zamarramala****Provincia:** Segovia**Fecha realización reciclado:** 09/04/97 (3 días)**Tráfico (IMD/IMD pesados) en el año del reciclado (o del proyecto):** T3**IMD/IMD pesados actual:****Longitud:** 1,5 km (10.500 m<sup>2</sup>)**Ancho sección:** 6,50 – 7,20 m reciclados 8 m para obtener una buena explanada **¿es ensanche?:****Firme existente:** 3 – 4 cm MBC + 20 cm Zahorra Natural con IP > 12**Firme construido:** 23 cm Hormigón Poroso + 25 cm suelocemento + 25 cm reciclados (40 cm en blandones).**Presupuesto (total y millones/km):****Contratista:** COLLOSA**Subcontratista reciclado:** ASFALTECNICA**Características reciclado:**

- **% cemento y tipo:** 2% II-C/35A (8 kg/m<sup>2</sup> para obtener la explanada)
- **Ensayos previos:** 2% cemento → R (7 días) = 15,3 kp/cm<sup>2</sup>
- otros datos:** - **Plasticidad:**
- **Materia orgánica:**
- **Otros:** CBR = 121

- **Granulometría ensayos previos:**

Tamices UNE	40	25	20	10	5	2	0,40	0,080
Material reciclado + Cemento	100	97,9	93	60,1	38,4	26,3	6,7	1,7

- **Granulometría después de reciclar:**
- **Proctor Modificado:** Hopt = 7,6%      Dmáx = 2,06
- **Resultados en obra:**
- R media 7 días = 14 kp/cm<sup>2</sup>
- D in situ = 101% Dmáx    87% Hoptima
- **Otros ensayos:** CBR (7 días) = 136
- **Corrector granulométrico (tipo):**

**Equipos:**

- **Equipo de reciclado:** Wirtgen WG-2500 + WM-400 (4 bandas/sección)
- **Equipo de compactación:** Rodillo mixto Hamm 5011

**Proceso compactación:****Rendimiento medio/máximo =** 4.000 m<sup>2</sup>/día – 7.000 m<sup>2</sup>/día**Riego de curado:** emulsión      **extendido (tiempo):****Capa de Protección:** sellado con arena**Apertura inmediata al tráfico (¿hay desvíos?):** no**Periodo hasta paso del tráfico:****Periodo sin capa superior:** una semana**Riego de adherencia:****Características mezcla bituminosa (capas, tipo, % betún, ensayos control, etc):****Situación actual del firme:****Observaciones:**

- IRI medio capa reciclada calzada dcha/izda = 3,9/3,4
- Deflexión media capa reciclada = 54 mm/100



**TRAMO: SG-211, de C-601 a Aguilafuente****Provincia:** SEGOVIA**Fecha realización reciclado:** 16/10/97 a 27/10/97 y 03/06/98 a 05/07/98**Tráfico (IMD/IMD pesados) en el año del reciclado (o del proyecto):****IMD/IMD pesados actual:****Longitud:** 8,5 km (59.500 m<sup>2</sup>)**Ancho sección:** 6 – 6,50 **¿es ensanche?:****Firme existente:** 5 cm MBF + 20 cm macadam silicio**Firme construido:** 25 cm estabilizado + 5 cm S-20 + 6 cm S-12**Presupuesto (total y millones/km):****Contratista:** Canteras Ortiz, S.A. – Grecoc, S.A. (UTE)**Subcontratista reciclado:****Características reciclado:**

- **% cemento y tipo:** 3% CEM IV/B 32,5
- **Ensayos previos:** Ensayos de dosificación y determinación fórmula trabajo

% cemento	humedad	densidad	Resistencia 7 días	Resistencia 90 días
2,5	6,4	2,199	16,3	22,0
3,0	5,5	2,197	20,5	24,0
3,5	6,0	2,192	22,7	31,4

**otros datos:** - **Plasticidad:**- **Materia orgánica:**- **Otros:**

- **Granulometría ensayos previos:**

Tamices UNE	50	40	25	20	10	5	2	0,40	0,08
Material reciclado + arena	100,0	100,0	81,2	74,6	57,8	39,4	31,3	17,0	8,1
Material reciclado + cemento	100,0	97,7	81,9	76,8	57,6	34,7	26,5	18,1	13,1

- **Granulometría después de reciclar:**
- **Proctor Modificado:** Hopt = 5,5% Dmáx = 2,24
- **Resultados en obra:**
  - R media 7/90 días = 28,6 / 52 Kp/cm<sup>2</sup>
  - D in situ = 2,05 Humedad 5,7 %
- **Otros ensayos:**
- **Corrector granulométrico (tipo):** Si, 10% arena machacada caliza

**Equipos:**

- **Equipo de reciclado:** Fresadora Wirtgen WG-2.500 + WM-400
- **Equipo de compactación:** 1 rodillo vibrante mixto

**Proceso compactación:****Rendimiento (medio/máximo) =** 7.000 m<sup>2</sup>/día**Riego de curado:** Riego curado con emulsión ECL-1 (0,4 kg/m<sup>2</sup>) **extendido (tiempo):****Capa de Protección:** No**Apertura inmediata al tráfico (¿hay desvíos?):** No**Periodo hasta paso del tráfico:****Periodo sin capa superior:** 2 semanas**Riego de adherencia:****Características mezcla bituminosa (capas, tipo, % betún, ensayos control, etc):****Situación actual del firme:****Observaciones:**

## TRAMO: SG-241 / SG-242, Sepúlveda – Sacramenta

Provincia: Segovia

Fecha realización reciclado: 25/05/98 a 3/07/98

Tráfico (IMD/IMD pesados) en el año del reciclado (o del proyecto):

SG-241: 218 vehículos, 12% pesados T4

SG-242: 123 vehículos, 245 pesados

IMD/IMD pesados actual:

Longitud: 14,5 km (82.650 m<sup>2</sup>)

Ancho sección: 4,50/5,00 existentes → 5,60/6,00 finales ¿es ensanche?: No

Firme existente: Macadam en base y tratamiento superficial en rodadura

Firme construido: 25 cm reciclado (15 cm firme + 10 cm ZA aportada) + 10 cm MBFrío + LB4

Presupuesto (total y millones/km):

Contratista: PROBISA

Subcontratista reciclado:

Características reciclado:

- % cemento y tipo: 2,1 % CEM II/B-M 32,5 ¿3,2%?
- Ensayos previos:

% cemento	humedad	Densidad	Resistencia 7 días
2	5,28	2,13	22,7
3			32,2
4			38,5

otros datos: - Plasticidad:

	LL	LP	IP	Equivalente Arena
Zahorra artificial	No plástico	No plástico	No plástico	32
Firme existente (10 muestras)	20,32	14,36	5,96	22,3

- Granulometría ensayos previos:

Tamices UNE	80	63	50	40	25	20	12,5	10	5	2,5	1,25	0,63	0,32	0,16	0,08
Firme existente (10 muestras)	100	96	88,6	74,5	56,1	50,6	40,7	37,0	28,9	24,2	20,1	17,7	14,1	11,2	9,29
Zahorra artificial				100	99	97	87	78	54	39	28	22	18	15	12,3
Zahorra artificial + firme	100	96,75	93	84,5	73	68,75	58,75	53,25	38,5	29,75	23	19	15,5	12,5	10,25

- Granulometría después de reciclar:
- Proctor Modificado: Hopt =                      Dmáx =
- Resultados en obra:
- R media 3/7 días = 13,6 / 20,7
- D in situ = 2,11 (desviación típica 0,04 en 143 muestras)
- Otros ensayos:
- Corrector granulométrico (tipo): 10 cm de Zahorra artificial ZA(25) colocados con extendedora

Equipos:

- Equipo de reciclado: Recicladora Wirtgen 2100 DCR con regla + WM-400 (3 bandas/sección)
- Equipo de compactación: Rodillo liso CC-501 + rodillo neumáticos CCR-21-35

Proceso compactación:

Rendimiento (medio/máximo) = 2.755/4.500 m<sup>2</sup>/día

Riego de curado: emulsión EAR-1                      extendido (tiempo):

Capa de Protección: si, con arena

Apertura inmediata al tráfico (¿hay desvíos?): Tráfico desviado por rutas alternativas

Período hasta paso del tráfico:

Período sin capa superior: 7 días

Riego de adherencia:

Características mezcla bituminosa (capas, tipo, % betún, ensayos control, etc):

Situación actual del firme:

Observaciones: La zahorra artificial ZA(25) se extendió para obtener un paquete estructural de firme de al menos 25 cm de espesor a reciclar

**TRAMO: SG-331. Acceso a Estación de Yanguas**

**Provincia:** Segovia  
**Fecha realización reciclado:**  
**Tráfico (IMD/IMD pesados) en el año del reciclado (o del proyecto):** 206/25 (proyecto)  
**IMD/IMD pesados actual:**  
**Longitud:**  
**Ancho sección: 5 m ¿es ensanche?:**  
**Firme existente:** 9 cm MB + 10 cm Macadam + Jabre  
**Firme construido:** 5 MBF + 20 cm Reciclado  
**Presupuesto (total y millones/km):** 40.772.944 pts

**Contratista:**  
**Subcontratista reciclado:**  
**Características reciclado:**

- % cemento y tipo:
- Ensayos previos:

% cemento	humedad	densidad	Resistencia 7 días

otros datos: - Plasticidad:  
 - Materia orgánica:  
 - Otros:

- Granulometría ensayos previos:
- Granulometría después de reciclar:
- Proctor Modificado: Hopt =            Dmáx =
- Resultados en obra:
  - R media 7 días =
  - D in situ =            (% Dmáx)
- Otros ensayos:
- Corrector granulométrico (tipo):

**Equipos:**

- Equipo de reciclado:
- Equipo de compactación:

Proceso compactación:

**Riego de curado:**                            extendido (tiempo):

**Capa de Protección:**

**Apertura inmediata al tráfico (¿hay desvíos?):**

**Período hasta paso del tráfico:**

**Período sin capa superior:**

**Riego de adherencia:**

**Características mezcla bituminosa (capas, tipo, % betún, ensayos control, etc):**

**Situación actual del firme:**

**Observaciones:**

**TRAMO: SG-351, SG-412 y SG-411, Santiuste de San Juan Bautista a N-VI (Arévalo)**

Provincia: Segovia  
 Fecha realización reciclado: junio 2000  
 Tráfico (IMD/IMD pesados) en el año del reciclado (o del proyecto):  
 IMD/IMD pesados actual:  
 Longitud:  
 Ancho sección: ¿es ensanche?:  
 Firme existente: 22-24 cm macadam 6/9 cm calizo + 4 cm MB  
 Firme construido: 25 cm reciclado + 10 cm MBC  
 Presupuesto (total y millones/km):

Contratista: CANTERAS ORTIZ  
 Subcontratista reciclado:  
 Características reciclado:

- % cemento y tipo: 3,5% CEM II/B-M 32,5 (4% CEM II/B-P 32,5 a partir de la mitad obra) vuelto a reciclar defectos en 2,5% del pk 0+000 a 1+800 y 5+330 a 5+400
- Ensayos previos:

% cemento	humedad	densidad	Resistencia 7 días
3	6,4	2,05	23,2
4	7,1	2,05	26,1
5	7,4	2,07	27,2

otros datos: - Plasticidad: No plástico  
 - Materia orgánica: No  
 - Otros:

- Granulometría ensayos previos: es un macadam 6/9 sin finos
- Granulometría después de reciclar: pase UNE 50=82% 20=42% 5=30% 0,08=6,4%
- Proctor Modificado: Hopt = 6,8% Dmáx = 2,05 ensayos previos  
 5,7% 2,18 en el 1<sup>er</sup> tramo (hasta San Cristóbal)
- Resultados en obra:

cemento	H%	Ddensidad	R (7 días)
3,5 %	5-7,9	2,06 - 2,20	16,90 - 36,80
4 %		2,12 - 2,25	28,7 - 54,00

D in situ = 95-98 % Dmáx

- Otros ensayos:
- Corrector granulométrico (tipo): Aportación de arena del pk 0+000 a 1+800 y 5+330 a 5+400

Equipos: Dosificación en seco con camión tolva. Agua con cuba a chorro (sin dosificación).  
 Hasta San Cristóbal de la Vega: fresadora de MBC Wirtgen 2100  
 2º tramo hasta Arévalo (>pk 6+740): WM-400 y WR-2500: reciclado en 3 bandas

- Equipo de compactación:  
 Proceso compactación: 2 pasadas rodillo + motoniveladora + 2-3 pasadas + neumáticos

Riego de curado: emulsión extendido (tiempo):

Capa de Protección: arena 0-6

Apertura inmediata al tráfico: No, hay desvíos durante toda la obra

Período hasta paso del tráfico:

Período sin capa superior: 1 mes

Riego de adherencia:

Características mezcla bituminosa (capas, tipo, % betún, ensayos control, etc):

Situación actual del firme:

Observaciones: 1<sup>er</sup> tramo hasta San Cristóbal se hace con fresadora de MB sin partición del macadam y con mucha segregación (nidos de gruesos). La motoniveladora provoca mucha segregación

**TRAMO: C-519 Villabrágima –Villagarcía de Campos**

Provincia: Valladolid

Fecha realización reciclado: 04/05/94 a 25/05/94

Tráfico (IMD/IMD pesados) en el año del reciclado (o del proyecto): T3 (935 vehículos con 8% pesados)

IMD/IMD pesados actual:

Longitud: 16 km (106.000 m<sup>2</sup>)

Ancho sección: 6,40 m pavimentados sin arcenes (en 1987 se realizó un ensanche) ¿es ensanche?: No

Firme existente: 8 cm MB + 25 cm ZA (en ensanche), Macadam en tronco carretera antigua

Firme construido: 33 cm reciclado + 5 cm microaglomerado con fibras acrílicas o 6 cm MBC S-12

Presupuesto (total y millones/km):

Contratista: Dragados

Subcontratista reciclado:

Características reciclado:

- % cemento y tipo: 4,1% II/C-35 A (28 kg/m<sup>2</sup>)
- Ensayos previos: Preparación de la fórmula de trabajo

CEMENTO %	PROCTOR MODIFICADO		CBR 3 HORAS		RESISTENCIA 7 DÍAS	
	HUMEDAD ÓPTIMA	DENSIDAD MÁXIMA	HUMEDAD ÓPTIMA	CBR CALIENTE	HUMEDAD ÓPTIMA	RESISTENCIA MÁXIMA
3,0	8,2	2,019	8,0	32,0	6,5	17,2
4,0	8,2	2,033	7,8	37,7	6,6	24,7
5,0	8,2	2,052	7,7	42,5	6,8	29,9
6,0	8,3	2,071	7,7	46,5	6,8	37,8

otros datos: - Plasticidad:

	LL	LP	IP	Equivalente Arena
Zahorra artificial	20,2	13,7	6,5	29
Zahorra artificial + aglomerado	No Plástico	No plástico	No Plástico	70

- Materia orgánica:

- Otros:

- Granulometría ensayos previos:

Tamices UNE	40	25	20	10	5	2	0,40	0,080
Zahorra artificial	100,0	85,0	80,0	56,7	36,9	29,0	15,5	8,7
Zahorra artificial + aglomerado	100,0	92,9	87,5	64,0	54,4	33,7	9,3	7,2

- Granulometría después de reciclar:

- Proctor Modificado: Hopt = Dmáx =

- Resultados en obra:

R media 7 días = R. Testigos 13 meses = 47,7 densidad testigos = 2,19

D in situ = (% Dmáx)

- Otros ensayos:

- Corrector granulométrico (tipo): No

Equipos:

- Equipo de reciclado: Fresadora Wirtgen 2000 DC + Dosificador en polvo ELDE-15 + mezclador Raco-250
- Equipo de compactación: 1 rodillo vibrante mixto
- Equipo de prefisuración: Oliva, con juntas cada 3-5 m

Rendimiento medio/máx: 900 m<sup>2</sup>/h – 1.500 m<sup>2</sup>/hRiego de curado: ECL-1 (0,4 kg/m<sup>2</sup>) extendido (tiempo):

Capa de Protección: sellado con gravilla

Apertura inmediata al tráfico: Si

Período hasta paso del tráfico:

Período sin capa superior: 1 día

Riego de adherencia:

Características mezcla bituminosa (capas, tipo, % betún, ensayos control, etc):

Situación actual del firme:

Deflexiones: reducción de valores medios de 120 a 30 (al año de reciclar)

Observaciones: Las fisuras se reflejaron en el pavimento al poco tiempo pero sin sufrir mayor deterioro ni evolución después de 11 años

## TRAMO: SG-321 Y SG-322.Cruce N-VI a cruce N-110

Provincia: Segovia

Fecha realización reciclado:

Tráfico (IMD/IMD pesados) en el año del reciclado (o del proyecto): 292/35 (12%) T41

IMD/IMD pesados actual:

Longitud: 30,6 km (23,5 km reciclados)

Ancho sección: 5,00 m ¿es ensanche?: En algunos tramos 30 cm a cada lado con zahorra

Firme existente: 6 cm MB + 12-22 cm macadam

Firme construido: 25 cm reciclado + 5 cm MB Frío + LB-4

Presupuesto (total y millones/km): 276.095.037 pts

Contratista:

Subcontratista reciclado:

Características reciclado:

- % cemento y tipo: 5,5% CEM IV/B 32,5
- Ensayos previos:

% cemento	humedad	densidad	Resistencia 7 días
3	7,1	2,02	12,0
4	7,4	2,05	16,2
5	7,7	2,08	21,9

otros datos: - Plasticidad: < Pk 12,7 (SG-321) No plástico  
> Pk 12,7 (SG-322) LL=21 IP = 4-6

- Materia orgánica:

- Otros:

- Granulometría ensayos previos:

Pase	80	50	40	25	20	10	5	2	0,40	0,08
SG-321	100	100	86	71	67	49	38	33	23	12
SG-322	100	83	60	45	39	30	24	20	14	6-11

- Granulometría después de reciclar:
- Proctor Modificado: Hopt = 7,8 Dmáx = 2,08
- Resultados en obra:  
R media 7 días =  
D in situ = (% Dmáx)
- Otros ensayos:

Corrector granulométrico (tipo):

Equipos:

- Equipo de reciclado:
- Equipo de compactación:

Proceso compactación:

Riego de curado: extendido (tiempo):

Capa de Protección:

Apertura inmediata al tráfico (¿hay desvíos?):

Período hasta paso del tráfico:

Período sin capa superior:

Riego de adherencia:

Características mezcla bituminosa (capas, tipo, % betún, ensayos control, etc):

Situación actual del firme:

Observaciones: Se añadió ZA para corregir los peraltes

**TRAMO: ZA-513 y LE-513. Fuentes de Ropel – Valdéras. LEÓN - ZAMORA**

Provincia: León y Zamora  
 Fecha realización reciclado:  
 Tráfico (IMD/IMD pesados) en el año del reciclado (o del proyecto): 1066/130 (12%) T32  
 IMD/IMD pesados actual:  
 Longitud: 12,3 km (7,26 km reciclados)  
 Ancho sección: 6,0 m ¿es ensanche?:  
 Firme existente: 3 cm riegos + 4 cm gravillas + 16 cm macadam + suelo explanada  
 Firme construido: 25 cm reciclado + 10 cm MBC  
 Presupuesto (total y millones/km):

Contratista:  
 Subcontratista reciclado:  
 Características reciclado:

- % cemento y tipo: 3,5 % CEM IV/B 32,5
- Ensayos previos:

% cemento	humedad	densidad	Resistencia 7 días ZA-513	Resistencia 7 días LE-513
3%	7,1	2,17	20	25
4%	7,3	2,16	22	29
5%	7,2	2,18	31	29

otros datos: - Plasticidad: Firme: No plástico  
 Suelo Ex: LL = 18 IP = 8,6

- Materia orgánica:
- Otros:

- Granulometría ensayos previos:

	Tamiz	63	50	40	25	20	10	5	2	1,25	0,40	0,08
ZA-513	Firme	100	94	85	70	63	48	39	33	31	26	12,7
	Suelo Ex					100	97	90	82	79	64	40
LE-513	Mezcla	100	89	75	56	48	35	25	20	18	15	6

- Granulometría después de reciclar:
- Proctor Modificado: Hopt = 7% Dmáx = 2,16
- Resultados en obra:  
 R media 7 días =  
 D in situ = (% Dmáx)
- Otros ensayos:
- Corrector granulométrico (tipo): ¿Caliza 0-5 que estaba en el proyecto?

Equipos:

- Equipo de reciclado:
- Equipo de compactación:  
 Proceso compactación:

Riego de curado: extendido (tiempo):  
 Capa de Protección:  
 Apertura inmediata al tráfico (¿hay desvíos?):  
 Período hasta paso del tráfico:  
 Período sin capa superior:  
 Riego de adherencia:  
 Características mezcla bituminosa (capas, tipo, % betún, ensayos control, etc):

Situación actual del firme:  
 Observaciones:

## TRAMO: ZA-511, Villalpando – Villanueva del Campo

Provincia: Zamora

Fecha realización reciclado: 15 octubre a 13 noviembre de 1998

Tráfico (IMD/IMD pesados) en el año del reciclado (o del proyecto):

IMD/IMD pesados actual:

Longitud:

Ancho sección:

¿es ensanche?:

Firme existente: macadam + riegos asfálticos

Firme construido: MBC + 25 cm reciclado (10 cm ZN apertura para corregir bombeo excesivo)

Presupuesto (total y millones/km):

Contratista: Ecoasfalt, S.A.

Subcontratista reciclado:

Características reciclado:

- % cemento y tipo: 4%
- Ensayos previos:

% cemento	humedad	densidad	Resistencia 7 días

otros datos: - Plasticidad:

- Materia orgánica:

- Otros:

- Granulometría ensayos previos:
- Granulometría después de reciclar:
- Proctor Modificado:  $H_{opt} =$                        $D_{m\acute{a}x} =$
- Resultados en obra:  
 $R$  media 7 días = 34 kg/cm<sup>2</sup>  
 $D$  in situ =                      (%  $D_{m\acute{a}x}$ )
- Otros ensayos: Zahorra natural LL= 30-43 IP = 13-18

H	R 3 días	R 4 días	R 5 días	R 7 días
6,3	-	22	-	40
5,1	18	-	-	22
5,1	27	-	-	36
6,6	30	-	-	38
4,7	-	34	-	38
6,6	-	-	28	33
8,6	-	-	-	32

Corrector granulométrico (tipo): Zahorra natural (10 cm para corregir el exceso de bombeo)

Equipos:

- Equipo de reciclado:
- Equipo de compactación:

Proceso compactación:

Riego de curado:                      extendido (tiempo):

Capa de Protección:

Apertura inmediata al tráfico (¿hay desvíos?):

Período hasta paso del tráfico:

Período sin capa superior:

Riego de adherencia:

Características mezcla bituminosa (capas, tipo, % betún, ensayos control, etc):

Situación actual del firme:

Observaciones:





---

## **ANEJO 2**



## **CUADROS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS**



Tabla A2.1. Ensayos previos de dosificación del reciclado de la carretera SA-801

RESISTENCIA A COMPRESIÓN ENSAYOS PREVIOS DE DOSIFICACION									
Fecha toma	Localización	% cemento	Nº probetas	Días de curado	Fecha de rotura	Humedad de fabricación (%)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Tensión de rotura (MPa)	Tensión media (MPa)
jul-07	Acopio Planta Arevalillo	2,5	3	7	jul-07	5,9	2,14	1,2	0,97
							2,09	0,75	
							2,01	0,97	
jul-07	Acopio Planta Arevalillo	3,5	3	7	jul-07	6,4	2,18	2,32	2,01
							1,99	1,91	
							2,14	1,81	
jul-07	Acopio Planta Arevalillo	4,5	3	7	jul-07	5,7	2,3	4,06	3,28
							2,28	3,07	
							2,26	2,71	
jul-07	Cata P.K. 12	2,5	3	7	jul-07	5,2	2,2	1,56	1,64
							2,18	1,12	
							2,21	2,23	
jul-07	Cata P.K. 12	3,5	3	7	jul-07	6,1	2,19	2,8	2,58
							2,17	2,51	
							2,19	2,42	
jul-07	Cata P.K. 12	4,5	3	7	jul-07	5,6	2,18	2,9	3,17
							2,19	3,46	
							2,16	3,16	
27/08/2007	P.K. 15+800	4	2	7	03/09/2007	6,6	2,06	3,7	3,57
							2,04	3,43	

Tabla A2.2. Resultados de resistencia a compresión del reciclado de la carretera SA-801

RESISTENCIA A COMPRESIÓN ENSAYOS DE OBRA										
Fecha toma	Localización P.K.	% cemento	Nº probetas	Días de curado	Fecha de rotura	Humedad de fabricación (%)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad húmeda (g/cm <sup>3</sup> )	Tensión de rotura (MPa)	Tensión media (MPa)
27/08/2007	15+500	4,0	4	3	30/08/2007	4,3	2,15	2,24	2,55	2,550
				7	03/09/2007	4,3	2,19	2,28	3,23	3,027
							2,17	2,26	2,77	
							2,18	2,27	3,08	
29/08/2007		4,0	5	5	03/09/2007	5,5	1,95	2,06	2,2	2,200
				7	05/09/2007	5,5	1,99	2,1	3,09	3,033
							1,98	2,09	2,97	
				28	26/09/2007	5,5	1,98	2,09	3,04	3,280
30/08/2007	13+825	4,0	4	4	03/09/2007	3	2,14	2,22	2,38	2,380
				7	06/09/2007	3	2,15	2,21	3,01	3,017
							2,17	2,23	3,03	
							2,15	2,21	3,01	
03/09/2007	12+800	3,5	4	3	06/09/2007	3,5	2,14	2,22	2,24	2,240
				7	10/09/2007	3,5	2	2,07	2,57	2,610
							2,01	2,08	2,68	
							2	2,07	2,58	
04/09/2007	12+180 EJE	3,5	5	3	07/09/2007	2,8	2,13	2,19	2,02	2,020
				7	11/09/2007	2,8	2,13	2,19	2,62	2,673
							2,14	2,2	2,65	
				28	02/10/2007		2,16	2,22	2,75	
05/09/2007	11+300	3,5	4	5	10/09/2007	6,2	2,02	2,15	2,24	2,240
				7	12/09/2007	6,2	2,02	2,15	2,6	2,620
							2,03	2,16	2,69	
							2,01	2,13	2,57	
06/09/2007	10+000	3,5	5	4	10/09/2007	4,3	2,12	2,21	2,01	2,010
				7	13/09/2007		2,1		2,55	2,557
							2,11		2,64	
				28	04/10/2007				2,48	
07/09/2007	9+600	3,5	4	3	10/09/2007	3	2,1	2,16	1,91	1,910
				7	14/09/2007		2,09		2,54	2,560
							2,05		2,52	
							2,07		2,62	
10/09/2007	8+000	3,5	4	3	13/09/2007	4,7	2,12	2,2	2,76	2,760
				7	17/09/2007	4,7	2,12	2,22	3,53	3,543
							2,12	2,22	3,67	
							2,11	2,21	3,43	
11/09/2007	7+700	3,5	5	3	14/09/2007	4,7	2,02	2,12	2,63	2,630
				7	18/09/2007	4,7	2,02	2,11	3,01	3,080
							2,03	2,13	3,13	
				28	09/10/2007				3,1	
12/09/2007	5+600	3,5	4	3	15/09/2007	4,6	2,04	2,13	2,37	2,370
				7	19/09/2007	4,6	2,05	2,14	2,88	2,847
							2,07	2,16	2,97	
							2,03	2,12	2,69	
13/09/2007	4+500	3,5	4	4	17/09/2007	4,2	2,02	2,11	2,52	2,520
				7	20/09/2007	4,2	2,03	2,12	2,9	2,967
							2,04	2,13	3,04	
							2,04	2,13	2,96	
20/09/2007	8+100	3,5	5	4	24/09/2007	3,9	1,99	2,07	2,36	2,360
				7	27/09/2007		2,01		2,75	2,707
							1,97		2,65	
				28	18/10/2007				2,72	
21/09/2007	2+900	3,5	4	3	24/09/2007	4,1	2,08	2,17	2,75	2,750
				7	28/09/2007		2,11		3,85	3,880
							2,13		4,04	
							2,11		3,75	

Tablas A2.3 y A2.4. Resistencias a compresión obtenidas en el reciclado de la obra SA-801

4% DE CEMENTO Y 7 DÍAS		
Humedad de fabricación (%)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Tensión de rotura (MPa)
4,3	2,19	3,23
4,3	2,17	2,77
4,3	2,18	3,08
5,5	1,99	3,09
5,5	1,98	2,97
5,5	1,98	3,04
3	2,15	3,01
3	2,17	3,03
3	2,15	3,01
Valores medios	2,107	3,026

3,5% DE CEMENTO Y 7 DÍAS		
Humedad de fabricación (%)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Tensión de rotura (MPa)
3,5	2	2,57
3,5	2,01	2,68
3,5	2	2,58
2,8	2,13	2,62
2,8	2,14	2,65
2,8	2,16	2,75
6,2	2,02	2,6
6,2	2,03	2,69
6,2	2,01	2,57
4,3	2,1	2,55
4,3	2,11	2,64
4,3	2,09	2,48
3	2,09	2,54
3	2,05	2,52
3	2,07	2,62
4,7	2,12	3,53
4,7	2,12	3,67
4,7	2,11	3,43
4,7	2,02	3,01
4,7	2,03	3,13
4,7	2,03	3,1
4,6	2,05	2,88
4,6	2,07	2,97
4,6	2,03	2,69
4,2	2,03	2,9
4,2	2,04	3,04
4,2	2,04	2,96
3,9	2,01	2,75
3,9	1,97	2,65
3,9	1,99	2,72
4,1	2,11	3,85
4,1	2,13	4,04
4,1	2,11	3,75
Valores medios	2,061	2,913

Tabla A2.5. Ensayos de determinación de la densidad en la obra con el método nuclear

DENSIDAD IN SITU. TRAMOS 3,5% CEMENTO				
D máx=2,170 g/cm <sup>3</sup> H óptima=6,1 %				
Situación P.K.	Densidad húmeda (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Humedad (%)	Compactación (% Proctor Normal)
15+900	2,172	1,998	8,7	92,1
15+860	2,132	2,006	6,3	92,4
15+820	2,355	2,137	10,2	98,5
15+780	2,102	1,968	6,8	90,7
15+740	2,13	1,991	7	91,8
15+600	2,216	2,063	7,4	95,1
15+560	2,161	1,995	8,3	91,9
14+750	2,278	2,155	5,7	99,3
14+670	2,232	2,061	8,3	95
14+590	2,118	1,985	6,7	91,5
14+510	2,178	2,037	6,9	93,9
14+430	2,19	2,066	6	95,2
14+350	2,108	1,977	6,6	91,1
14+270	2,29	2,154	6,3	99,3
14+190	2,14	2,044	4,7	94,2
14+110	2,195	2,051	7	94,5
14+000	2,222	2,073	7,2	95,5
15+320	2,086	1,957	6,6	90,2
15+300	2,12	1,968	7,7	90,7
15+280	2,179	2,012	8,3	92,7
15+200	2,166	2,026	6,9	93,4
15+150	2,202	2,091	5,3	96,4
15+100	2,255	2,127	6	98
15+050	2,156	2,038	5,8	93,9
15+000	2,132	2,036	4,7	93,8
14+960	2,159	2,046	5,5	94,3
14+920	2,274	2,157	5,4	99,4
Media	2,183	2,045	6,752	94,252

DENSIDAD IN SITU. TRAMOS 4% CEMENTO				
D máx=2,06 g/cm <sup>3</sup> H óptima=6,3 %				
Punto	Profundidad (cm)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Humedad (%)	Compactación (% Proctor Normal)
1	20	2,04	6,9	99,03
2	20	2,17	5,3	105,34
3	20	2,12	4,9	102,91
4	20	2,1	6,6	101,94
5	20	2,13	7,3	103,4
6	20	2,07	6,5	100,49
7	20	2,16	6,8	104,85
8	20	2,11	7,7	102,43
9	20	2,08	7,1	100,97
10	20	2,1	6,9	101,94
Media		2,108	6,6	102,33

Tabla A2.6. Resultados del ensayo Proctor modificado en el laboratorio

## ENSAYO PROCTOR (MODIFICADO)

Molde	2320 cm <sup>3</sup>	Nº de capas	5
Maza	4,5 K	Nº golpes/capa	60

	PUNTO N°	1	2	3	4	5
	% DE AGUA AÑADIDA	5%	6%	7%	8%	9%
DENSIDAD	molde+suelo+agua	10308	10399	10607	10629	10764
	molde	5523	5523	5523	5524	5524
	suelo+agua	4785	4876	5084	5105	5240
	suelo	4570,44	4590,29	4766,42	4740,56	4869,59
	densidad	1,97	1,98	2,05	2,04	2,10
HUMEDAD	tara+suelo+agua	2361	2858	2835	2774	2784
	tara+suelo	2298	2752	2717	2644	2661
	tara	956	1049	946	953	1044
	suelo	1342	1703	1771	1691	1617
	agua	63	106	118	130	123
	humedad	4,69	6,22	6,66	7,69	7,61

DENSIDAD MÁXIMA

2,1

HUMEDAD OPTIMA

7,61

**ANEXO A (Informativo)**  
**MODELO DE IMPRESO PARA EXPRESIÓN DE RESULTADOS**

TRABAJO N°	DENOMINACION	MUESTRA N°
<b>ENSAYO PROCTOR</b>		
Molde: 2320 cm <sup>3</sup>	N° de capas: 5	Material utilizado:
Maza: 4.5 Kg	N° de golpes por capa: 60	% de materia no utilizado:
Altura de caída: 457 mm		

	Punto n°	1	2	3	4	5	
		% agua añadida	5	6	7	8	9
Densidad seca	t + s + a	Molde + suelo + agua	10307	10399	10607	10624	10764
	t	Molde	5523	5523	5523	5524	5524
	s + a = (t + s + a) - t	suelo + agua	4783	4876	5084	5105	5240
	$s = \frac{(s+a)100}{100+w}$	Suelo	4571.1	4600	4751.4	4727.85	4873.7
	$\rho_d = \frac{s}{V}$	Densidad seca	1.97	1.98	2.05	2.04	2.10
Humedad	-	Referencia tara	1	2	3	4	5
	t + s + a	Tara + suelo + agua	2381	2858	2838	2774	2784
	t + s	tara + suelo	2248	2752	2717	2644	2661
	t	Tara	456	1049	946	953	1044
	s = (t + s) - t	Suelo	1342	1703	1771	1691	1617
	a = (t + s + a) - (t + s)	Agua	63	106	121	130	123
	$w = \frac{a}{s} \times 100$	Humedad %	4.69	6.22	6.66	7.69	7.61

DENSIDAD MAXIMA 2.10      HUMEDAD OPTIMA 7.61

2.20

2.15

2.10

2.05

2.00

1.95

1.90

1.85

Humedad (%)	Densidad seca (g/cm³)
4.69	1.97
6.22	1.98
6.66	2.05
7.69	2.04
7.61	2.10

Descripción del suelo y observaciones

Tabla A2.7. Resultados de los ensayos a compresión para determinar la dosificación del material reciclado

Probeta n°	% Cemento	Peso del molde (g)	Peso del molde + muestra húmeda (g)	Peso suelo + agua	Peso suelo	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Peso al quitar el molde 1 día (g)	Peso a los 7 días (g)	Días de curado	Fecha de fabricación	Carga de rotura a compresión (KN)	Tensión de rotura (MPa)	Tensión media (MPa)
P1.1	3,0 %	7547	14910	7363	6842,301	2,151	7319	7261	7	19/11/2007	31,05	1,757	2,071
P1.2		7581	14796	7215	6704,767	2,108	7172	7115	7	19/11/2007	25,89	1,465	
P1.3		7508	14770	7262	6748,443	2,122	7219	7162	7	19/11/2007	52,86	2,991	
P2.1	3,5 %	7431	14518	7087	6585,819	2,070	7045	6989	7	19/11/2007	39,92	2,259	2,637
P2.2		7248	14585	7337	6818,140	2,143	7294	7236	7	19/11/2007	45,23	2,559	
P2.3		7504	14865	7361	6840,442	2,151	7317	7259	7	19/11/2007	54,63	3,092	

Tabla A2.8. Resultados de los ensayos para definir la frecuencia y segundos de martillo Kango para fabricar las probetas cilíndricas

Probeta n°	Peso del molde (g)	Peso del molde + muestra húmeda (g)	Peso suelo + agua	Peso suelo	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	% Densidad Proctor	Tiempo de compactación (s)	Frecuencia de compactación (rpm)	Frecuencia de compactación (rps)	Densidad seca media (g/cm <sup>3</sup> )
C1	7460	14080	6620	6151,845	1,934	92,096	5	975	16,250	2,063
C2	7540	14800	7260	6746,585	2,121	101,000	10	975	16,250	
C3	7520	14820	7300	6783,756	2,133	101,556	15	975	16,250	
C4	7240	14400	7160	6653,657	2,092	99,609	5	1450	24,167	2,103
C5	7560	14740	7180	6672,242	2,098	99,887	10	1450	24,167	
C6	7400	14660	7260	6746,585	2,121	101,000	15	1450	24,167	
C7	7460	14640	7180	6672,242	2,098	99,887	5	1950	32,500	2,115
C8	7560	14820	7260	6746,585	2,121	101,000	10	1950	32,500	
C9	7460	14740	7280	6765,171	2,127	101,278	15	1950	32,500	

Tabla A2.9. Resultados de los ensayos para definir el tiempo de vibración y contrapeso para fabricar las probetas prismáticas

Probeta n°	Peso del molde (g)	Peso del molde + muestra húmeda (g)	Peso suelo + agua	Peso suelo	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Peso compactación (Kg)	Tiempo compactación (s)	Peso al quitar el molde (g)	% Densidad Proctor
AP1.1	22960	53500	30540	28380,262	2,102	46,2	15	30340	100,107
AP1.2	22980	52380	29400	27320,881	2,024	46,2	20	29260	96,370
AP2.1	22860	53500	30640	28473,190	2,109	46,2	20	30360	100,435
AP2.2	22790	53260	30470	28315,212	2,097	46,2	20	rota al desmoldar	99,877
AP3.1	22720	53260	30540	28380,262	2,102	34,1	15	30300	100,095
AP3.2	22660	53300	30640	28473,190	2,109	34,1	20	30400	100,435
AP4.1	22820	53580	30760	28584,704	2,117	34,1	15	30060	100,828
AP4.2	22780	53460	30680	28510,361	2,112	34,1	20	30360	100,566
AP5.1	23140	53400	30260	28120,063	2,083	15,6	15	30400	99,189
AP5.2	22940	53580	30640	28473,190	2,109	6,1	15	30540	100,435
AP6.1	22720	52380	29660	27562,494	2,042	6,1	5	29600	97,222
AP6.2	22840	52120	29280	27209,367	2,016	6,1	5	29240	95,977

Tabla A2.10. Peso de las probetas cilíndricas para ensayar a compresión y tracción indirecta durante la fabricación y curado

Probeta n°	Fecha de fabricación	Peso del molde (g)	Peso del molde + muestra húmeda (g)	Peso suelo + agua	Peso suelo	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	% Densidad Proctor	Peso al quitar el molde a 1 día (g)	Peso a los 7 días (g)	Peso a los 28 días (g)	Peso a los 90 días (g)
A1.1	27/11/2007	7545	14916	7371	6849,735	2,153	102,544	7348	7279		
A1.2	27/11/2007	7588	14985	7397	6873,896	2,161	102,906	7360	7224		
A1.3	27/11/2007	7501	14872	7371	6849,735	2,153	102,544	7298	7208		
A1.4	27/11/2007	7436	14849	7413	6888,765	2,166	103,128	7387	7334		
A1.5	27/11/2007	7242	14637	7395	6872,038	2,160	102,878	7349	7297	7155	7046
A1.6	27/11/2007	7509	14893	7384	6861,816	2,157	102,725	7350	7211	7120	7015
A1.7	27/11/2007	7519	14943	7424	6898,987	2,169	103,281	7403	7352	7198	7090
A1.8	27/11/2007	7457	14649	7192	6683,394	2,101	100,054	7175	7128	7043	6936
A1.9	27/11/2007	7401	14785	7384	6861,816	2,157	102,725	7350	7296	7208	7106
A2.1	28/11/2007	7461	14715	7254	6741,009	2,119	100,916	7212	7159		
A2.2	28/11/2007	7594	14854	7260	6746,585	2,121	101,000	7232	7182		
A2.3	28/11/2007	7431	14646	7215	6704,767	2,108	100,374	7179	7124		
A2.4	28/11/2007	7502	14934	7432	6906,421	2,171	103,393	7394	7338		
A2.5	28/11/2007	7360	14642	7282	6767,029	2,127	101,306	7241	7197	7090	
A2.6	28/11/2007	7512	14862	7350	6830,220	2,147	102,252	7312	7262	7145	
A2.7	28/11/2007	7527	14944	7417	6892,482	2,167	103,184	7384	7327	7205	7090
A2.8	28/11/2007	7278	14549	7271	6756,807	2,124	101,153	7235	7185	7074	6969
A2.9	28/11/2007	7545	14699	7154	6648,081	2,090	99,525	7117	7064	6940	6847
A3.1	29/11/2007	7468	14798	7330	6811,635	2,141	101,974	7293	7246	7118	
A3.2	29/11/2007	7559	14834	7275	6760,524	2,125	101,208	7220	7151	7034	
A3.3	29/11/2007	7497	14713	7216	6705,696	2,108	100,388	7174	7118	6995	
A3.4	29/11/2007	7502	14770	7268	6754,019	2,123	101,111	7134	7103	6970	6875
A3.5	29/11/2007	7401	14664	7263	6749,373	2,122	101,041	7214	7140	7025	6909
A3.6	29/11/2007	7524	14777	7253	6740,080	2,119	100,902	7162	7128	7017	6897
A3.7	29/11/2007	7246	14529	7283	6767,958	2,128	101,320	7248	7225	7085	6975
A3.8	29/11/2007	7460	14778	7318	6800,483	2,138	101,807	7264	7245	7118	6994
A3.9	29/11/2007	7567	14767	7200	6690,828	2,103	100,165	7167	7143	7020	6907
PROMEDIO	Fecha de fabricación	7467,852	14777,926	7310,074	6793,118	2,136	101,696	7266,741	7209,852	7082,105	6975,429

Tabla A2.1.1. Peso de las probetas cilíndricas para ensayos de módulo

Probeta nº	Fecha de fabricación	Peso del molde (g)	Peso del molde + muestra húmeda (g)	Peso suelo + agua	Peso suelo	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	% Densidad Proctor	Peso al quitar el molde. 1 día (g)
M4.1	26/06/2008	7400	14680	7280	6765,171	2,127	101,278	7280
M4.2	26/06/2008	7560	14740	7180	6672,242	2,098	99,887	7160
M4.3	26/06/2008	7520	14760	7240	6727,999	2,115	100,721	7220
M4.4	26/06/2008	7460	14640	7180	6672,242	2,098	99,887	7160
M4.5	26/06/2008	7240	14460	7220	6709,414	2,109	100,443	7180
M4.6	26/06/2008	7560	14740	7180	6672,242	2,098	99,887	7140
M4.7	26/06/2008	7460	14660	7200	6690,828	2,103	100,165	7240
M4.8	26/06/2008	7540	14640	7100	6597,900	2,074	98,774	7140
M4.9	26/06/2008	7460	14720	7260	6746,585	2,121	101,000	7240

nombre Probeta	fecha	Peso material + gabetta kg	Peso sólo material seco kg	cemento kg	agua kg	mezcla húmeda kg	nº tongadas	Peso molde g	peso molde + mezcla húmeda g	Peso suelo + agua	Peso suelo	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	% Densidad Proctor
M 5.1	23/07/2009	70,00	64,44	2,2554	5,076	71,771	3	8680	16140	7460	6932,441	2,179	103,782
M 5.2	23/07/2009	70,00	64,44	2,2554	5,076	71,771	3	8900	16320	7420	6895,270	2,168	103,226
M 5.3	23/07/2009	70,00	64,44	2,2554	5,076	71,771	3	8820	16180	7360	6839,513	2,150	102,391
M 5.4	23/07/2009	70,00	64,44	2,2554	5,076	71,771	3	8920	16420	7500	6969,612	2,191	104,338
M 5.5	23/07/2009	70,00	64,44	2,2554	5,076	71,771	3	8820	16340	7520	6988,198	2,197	104,617
M 5.6	23/07/2009	70,00	64,44	2,2554	5,076	71,771	3	8980	16340	7360	6839,513	2,150	102,391
M 5.7	23/07/2009	70,00	64,44	2,2554	5,076	71,771	3	8940	16340	7400	6876,684	2,162	102,947
M 5.8	23/07/2009	70,00	64,44	2,2554	5,076	71,771	3	8960	16300	7340	6820,927	2,144	102,113
M 5.9	23/07/2009	70,00	64,44	2,2554	5,076	71,771	3	8880	16320	7440	6913,856	2,174	103,504

Tabla A2.12. Peso de las probetas prismáticas para ensayos de flexotracción durante la fabricación y curado

Probeta n°	Fecha de fabricación	Peso del molde (g)	Peso del molde + muestra húmeda (g)	Peso suelo + agua	Peso suelo	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	% Densidad Proctor	Peso al quitar el molde a 1 día (g)	Peso a los 7 días (g)	Peso a los 28 días (g)	Peso a los 90 días (g)
EA1.1	03/01/2008	22740	53260	30520	28361,676	2,101	100,041	30480	30440	29980	--
EA1.2	03/01/2008	22800	53400	30600	28436,019	2,106	100,303	30280	30380	30200	--
EA2.1	03/01/2008	22800	53420	30620	28454,605	2,108	100,369	30420	30420	30300	--
EA2.2	03/01/2008	22940	53810	30870	28686,925	2,125	101,188	30820	30780	30640	--
EA3.1	03/01/2008	22740	53240	30500	28343,091	2,099	99,976	30180	30120	29980	--
EA3.2	03/01/2008	22810	53080	30270	28129,356	2,084	99,222	30180	30120	29980	--
EA4.1	08/01/2008	22820	52980	30160	28027,135	2,076	98,861	29960	29840	--	--
EA5.1	08/01/2008	22980	53200	30220	28082,892	2,080	99,058	30100	30000	--	--
EA6.1	08/01/2008	22980	52640	29660	27562,494	2,042	97,222	29500	29360	--	--
EA7.1	09/01/2008	23060	53920	30860	28677,632	2,124	101,156	30660	30600	--	--
EA8.1	09/01/2008	23060	53480	30420	28268,748	2,094	99,713	30180	30120	--	--
EA9.1	09/01/2008	23140	54080	30940	28751,975	2,130	101,418	30760	30680	--	--
EA4.2	08/01/2008	22920	53560	30640	28473,190	2,109	100,435	30520	30420	30140	30040
EA5.2	08/01/2008	23040	53660	30620	28454,605	2,108	100,369	30520	30400	30160	30080
EA6.2	08/01/2008	23140	53280	30140	28008,549	2,075	98,796	30000	29840	29580	29560
EA7.2	09/01/2008	23000	53920	30920	28733,389	2,128	101,352	30740	30700	30580	30620
EA8.2	09/01/2008	22920	53780	30860	28677,632	2,124	101,156	30580	30520	30400	30580
EA9.2	09/01/2008	23000	54080	31080	28882,074	2,139	101,877	30920	30840	30720	30920
FG4.1	21/04/2008	22800	52800	30000	27878,450	2,065	98,337	29880	29860	--	--
FG4.2	21/04/2008	22800	53100	30300	28157,234	2,086	99,320	30180	30160	--	--
FG4.4	21/04/2008	22740	53000	30260	28120,063	2,083	99,189	30140	30120	--	--
FG5.1	09/07/2009	22760	52900	30140	28008,549	2,075	98,796	--	--	--	28640
FG6.1	13/07/2009	22760	53140	30380	28231,577	2,091	99,582	--	--	--	29170
FG6.3	14/07/2009	22800	53000	30200	28064,306	2,079	98,992	--	--	--	29850
FG6.5	14/07/2009	22800	53840	31040	28844,903	2,137	101,746	--	--	--	30520
FG6.8	14/07/2009	22740	52580	29840	27729,765	2,054	97,812	--	--	--	29180

Probeta n°	Fecha de fabricación	Peso del molde (g)	Peso del molde + muestra húmeda (g)	Peso suelo + agua	Peso suelo	Densidad seca (g/cm³)	% Densidad Proctor	Peso al quitar el molde a 1 día (g)	Peso a los 7 días (g)	Peso a los 28 días (g)	Peso a los 90 días (g)
FG6.10	14/07/2009	22600	53300	30700	28528,947	2,113	100,631	--	--	--	28330
FG6.11	14/07/2009	22740	53940	31200	28993,588	2,148	102,270	--	--	--	29140
FG6.12	14/07/2009	22660	52220	29560	27469,566	2,035	96,894	--	--	--	27690
FG7.2	21/07/2009	22640	52440	29800	27692,594	2,051	97,681	--	--	--	28360
FG8.2	22/07/2009	22760	54160	31400	29179,444	2,161	102,926	--	--	--	30190
FG9.1	23/07/2009	22860	53920	31060	28863,489	2,138	101,811	--	--	--	29900
FG9.4	23/07/2009	22760	53320	30560	28398,848	2,104	100,172	--	--	--	29360
FG10.1	16/12/2009	22660	52460	29800	27692,594	2,051	97,681	--	--	--	28780
FG10.4	16/12/2009	22680	52700	30020	27897,036	2,066	98,402	--	--	--	29220
FG10.6	16/12/2009	22740	54320	31580	29346,715	2,174	103,516	--	--	--	30780
FG11.1	16/02/2010	22620	54420	31800	29551,157	2,189	104,237	--	--	--	30502

Tabla A2.13. Peso de las probetas prismáticas para ensayos de fatiga durante la fabricación y curado

Probeta n°	Fecha de fabricación	Peso del molde (g)	Peso del molde + muestra húmeda (g)	Peso suelo + agua	Peso suelo	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	% Densidad Proctor	Peso al quitar el molde a 1 día (g)	Peso a los 7 días (g)	Peso a los 28 días (g)	Peso a los 90 días (g)
FG1.1	14/01/2008	23000	53960	30960	28770,560	2,131	101,483	31040	31000	30560	--
FG1.2	14/01/2008	23120	53780	30660	28491,776	2,111	100,500	30600	30540	30280	--
FG1.3	14/01/2008	23140	53120	29980	27859,864	2,064	98,271	29880	29800	29940	--
FG1.4	14/01/2008	22960	53320	30360	28212,991	2,090	99,517	30200	30080	30120	--
FG1.5	14/01/2008	22920	53260	30340	28194,406	2,088	99,451	30200	29880	29540	--
FG1.6	14/01/2008	22820	52920	30100	27971,378	2,072	98,664	29900	29700	29580	--
FG2.1	04/02/2008	22760	53260	30500	28343,091	2,099	99,976	30360	30210	29920	--
FG2.2	04/02/2008	22820	53440	30620	28454,605	2,108	100,369	30560	30450	30380	--
FG2.3	04/02/2008	22840	52740	29900	27785,522	2,058	98,009	29820	28700	29640	--
FG2.4	04/02/2008	22740	52640	29900	27785,522	2,058	98,009	29840	29650	29600	--
FG2.5	04/02/2008	22740	52720	29980	27859,864	2,064	98,271	29840	29760	29540	--
FG2.6	04/02/2008	22820	52520	29700	27599,665	2,044	97,353	29640	29520	29400	--
FG3.1	25/02/2008	22820	53100	30280	28138,649	2,084	99,254	30220	30020	29960	--
FG3.2	25/02/2008	22760	53040	30280	28138,649	2,084	99,254	30240	30200	30120	--
FG3.3	25/02/2008	22740	52380	29640	27543,909	2,040	97,157	29560	29400	29350	--
FG3.4	25/02/2008	22800	52700	29900	27785,522	2,058	98,009	29780	29730	29670	--
FG3.5	25/02/2008	22840	53060	30220	28082,892	2,080	99,058	30140	30090	29920	--
FG3.6	25/02/2008	22720	53020	30300	28157,234	2,086	99,320	30200	30170	29980	--
FG4.3	21/04/2008	22760	52700	29940	27822,693	2,061	98,140	29840	29820	--	--
FG4.5	21/04/2008	22820	53020	30200	28064,306	2,079	98,992	30060	30020	--	--
FG4.6	21/04/2008	22800	52660	29860	27748,351	2,055	97,878	29740	29700	--	--
FG5.2	09/07/2009	22640	52860	30220	28082,892	2,080	99,058	--	--	--	28760
FG6.2	13/07/2009	22760	53200	30440	28287,334	2,095	99,779	--	--	--	27910
FG6.4	14/07/2009	22780	52000	29220	27153,610	2,011	95,780	--	--	--	28770
FG6.6	14/07/2009	22760	52660	29900	27785,522	2,058	98,009	--	--	--	28700
FG6.7	14/07/2009	22760	54440	31680	29439,643	2,181	103,844	--	--	--	29680
FG6.9	14/07/2009	22660	53940	31280	29067,930	2,153	102,532	--	--	--	29970
FG6.11	14/07/2009	22740	53940	31200	28993,588	2,148	102,270	--	--	--	29140
FG6.13	14/07/2009	22720	53180	30460	28305,920	2,097	99,845	--	--	--	--
FG6.14	14/07/2009	22780	51660	28880	26837,654	1,988	94,665	--	--	--	28740
FG6.15	14/07/2009	22760	53800	31040	28844,903	2,137	101,746	--	--	--	--

Probeta n°	Fecha de fabricación	Peso del molde (g)	Peso del molde + muestra húmeda (g)	Peso suelo + agua	Peso suelo	Densidad seca (g/cm³)	% Densidad Proctor	Peso al quitar el molde a 1 día (g)	Peso a los 7 días (g)	Peso a los 28 días (g)	Peso a los 90 días (g)
FG6.16	14/07/2009	22700	52540	29840	27729,765	2,054	97,812	--	--	--	--
FG6.17	14/07/2009	22700	52720	30020	27897,036	2,066	98,402	--	--	--	--
FG6.18	14/07/2009	22720	50760	28040	26057,058	1,930	91,912	--	--	--	--
FG7.1	21/07/2009	22760	52780	30020	27897,036	2,066	98,402	--	--	--	--
FG7.3	21/07/2009	22780	54380	31600	29365,301	2,175	103,581	--	--	--	--
FG7.4	21/07/2009	22780	54760	31980	29718,428	2,201	104,827	--	--	--	--
FG8.1	22/07/2009	22800	54100	31300	29086,516	2,155	102,598	--	--	--	--
FG8.3	22/07/2009	22660	52780	30120	27989,964	2,073	98,730	--	--	--	--
FG8.4	22/07/2009	22740	54320	31580	29346,715	2,174	103,516	--	--	--	--
FG8.5	22/07/2009	22600	53940	31340	29123,687	2,157	102,729	--	--	--	--
FG8.6	22/07/2009	22640	53780	31140	28937,831	2,144	102,073	--	--	--	--
FG9.2	23/07/2009	22740	52720	29980	27859,864	2,064	98,271	--	--	--	--
FG9.3	23/07/2009	22680	52940	30260	28120,063	2,083	99,189	--	--	--	--
FG9.5	23/07/2009	22780	53260	30480	28324,505	2,098	99,910	--	--	--	--
FG9.6	23/07/2009	22740	53780	31040	28844,903	2,137	101,746	--	--	--	--
FG9.7	23/07/2009	22680	52940	30260	28120,063	2,083	99,189	--	--	--	--
FG9.8	23/07/2009	22760	53500	30740	28566,118	2,116	100,762	--	--	--	--
FG9.9	23/07/2009	22840	53200	30360	28212,991	2,090	99,517	--	--	--	--
FG9.10	23/07/2009	22640	53520	30880	28696,218	2,126	101,221	--	--	--	--
FG10.2	16/12/2009	22740	53120	30380	28231,577	2,091	99,582	--	--	--	29690
FG10.3	16/12/2009	22740	53000	30260	28120,063	2,083	99,189	--	--	--	29691
FG10.5	16/12/2009	22680	53560	30880	28696,218	2,126	101,221	--	--	--	29692
FG11.2	16/02/2010	22740	53580	30840	28659,047	2,123	101,090	--	--	--	29880
FG11.3	16/02/2010	22640	54560	31920	29662,671	2,197	104,630	--	--	--	30450
FG11.4	16/02/2010	22760	54620	31860	29606,914	2,193	104,434	--	--	--	30940

Tabla A2.14. Resultados de rotura de probetas cilíndricas a compresión y tracción indirecta

Probeta nº	Peso del molde (g)	Peso del molde + muestra húmeda (g)	Peso suelo + agua	Peso suelo	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	% Densidad Proctor	Peso al quitar el molde a 1 día (g)	Peso a los 7 días (g)	Peso a los 28 días (g)	Peso a los 90 días (g)	Días de curado	Fecha de fabricación	Fecha de rotura	Tipo de ensayo	Carga de rotura a compresión (kN)	Tensión de rotura (Mpa)	Tensión Media (MPa)
A1.1	7545	14916	7371	6849,735	2,153	102,544	7348	7279			7	27/11/2007	04/11/2007	Compresión	55,170	3,122	
A1.2	7588	14985	7397	6873,896	2,161	102,906	7360	7224			7	27/11/2007	04/11/2007	Compresión	53,160	3,008	3,005
A1.3	7501	14872	7371	6849,735	2,153	102,544	7298	7208			7	27/11/2007	04/11/2007	Compresión	51,010	2,887	
A1.4	7436	14849	7413	6888,765	2,166	103,128	7387	7334			7	27/11/2007	04/11/2007	Tracción indirecta	9,420	0,222	0,220
A1.5	7242	14637	7395	6872,038	2,160	102,878	7349	7297	7046	7046	90	27/11/2007	26/02/2008	Compresión	79,400	4,493	
A1.6	7509	14893	7384	6861,816	2,157	102,725	7350	7211	7015	7015	90	27/11/2007	26/02/2008	Compresión	72,200	4,085	4,345
A1.7	7519	14943	7424	6898,987	2,169	103,281	7403	7352	7198	7090	90	27/11/2007	26/02/2008	Compresión	78,780	4,458	
A1.8	7457	14649	7192	6683,394	2,101	100,054	7175	7128	7043	6936	90	27/11/2007	26/02/2008	Tracción indirecta	19,470	0,459	0,455
A1.9	7401	14785	7384	6861,816	2,157	102,725	7350	7296	7208	7106	90	27/11/2007	26/02/2008	Tracción indirecta	19,100	0,450	
A2.1	7461	14715	7254	6741,009	2,119	100,916	7212	7159			7	28/11/2007	05/11/2007	Compresión	41,120	2,327	
A2.2	7594	14854	7260	6746,585	2,121	101,000	7232	7182			7	28/11/2007	05/11/2007	Compresión	36,940	2,091	2,229
A2.3	7431	14646	7215	6704,767	2,108	100,374	7179	7124			7	28/11/2007	05/11/2007	Compresión	40,120	2,270	
A2.4	7502	14934	7432	6906,421	2,171	103,393	7394	7338			7	28/11/2007	05/11/2007	Tracción indirecta	6,860	0,160	0,160
A2.5	7360	14642	7282	6767,029	2,127	101,306	7241	7197	7090	7090	28	28/11/2007	26/12/2007	Compresión	52,960	2,997	2,997
A2.6	7512	14862	7350	6830,220	2,147	102,252	7312	7262	7145		28	28/11/2007	26/12/2007	Tracción indirecta	9,360	0,221	0,221
A2.7	7527	14944	7417	6892,482	2,167	103,184	7384	7327	7205	7090	90	28/11/2007	27/02/2008	Compresión	61,350	3,472	3,594
A2.8	7278	14549	7271	6756,807	2,124	101,153	7235	7185	7074	6969	90	28/11/2007	27/02/2008	Compresión	65,670	3,716	
A2.9	7545	14699	7154	6648,081	2,090	99,525	7117	7064	6940	6847	90	28/11/2007	27/02/2008	Tracción indirecta	13,690	0,323	0,323
A3.1	7468	14798	7330	6811,635	2,141	101,974	7293	7246	7118		28	29/11/2007	27/02/2007	Compresión	55,390	3,134	
A3.2	7559	14834	7275	6760,524	2,125	101,208	7220	7151	7034		28	29/11/2007	27/02/2007	Compresión	59,590	3,372	3,253
A3.3	7497	14713	7216	6705,696	2,108	100,388	7174	7118	6995		28	29/11/2007	27/02/2007	Tracción indirecta	12,570	0,296	0,296
A3.4	7502	14770	7268	6754,019	2,123	101,111	7134	7103	6970	6875	90	29/11/2007	28/02/2008	Compresión	64,280	3,638	
A3.5	7401	14664	7263	6749,373	2,122	101,041	7214	7140	7025	6909	90	29/11/2007	28/02/2008	Compresión	70,140	3,970	3,820
A3.6	7524	14777	7253	6740,080	2,119	100,902	7162	7128	7017	6897	90	29/11/2007	28/02/2008	Compresión	68,050	3,851	
A3.7	7246	14529	7283	6767,958	2,128	101,320	7248	7225	7085	6975	90	29/11/2007	28/02/2008	Tracción indirecta	15,490	0,365	
A3.8	7460	14778	7318	6800,483	2,138	101,807	7264	7245	7118	6994	90	29/11/2007	28/02/2008	Tracción indirecta	16,280	0,384	0,371
A3.9	7567	14767	7200	6690,828	2,103	100,165	7167	7143	7020	6907	90	29/11/2007	28/02/2008	Tracción indirecta	15,380	0,363	
PROMEDIO	7467,852	14777,926	7310,074	6793,118	2,136	101,696	7266,741	7209,852	7082,105	6975,429							

Tabla A2.15. Resultados de rotura de probetas prismáticas a flexotracción. 1ª fase (2007-2008)

Probeta n°	Peso del molde (g)	Peso del molde + muestra húmeda (g)	Peso suelo + agua	Peso suelo	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	% Densidad Proctor	Peso al quitar el molde a 1 día (g)	Peso a los 7 días (g)	Peso a los 28 días (g)	Peso a los 90 días (g)	Días de curado	Fecha de fabricación	Fecha de rotura	Carga de rotura (KN)	Tensión de rotura (MPa)
EA1.1	22740	53260	30520	28361,676	2,101	100,041	30480	30440	29980	--	28	03/01/2008	31/01/2008	4,059	0,561
EA1.2	22800	53400	30600	28436,019	2,106	100,303	30280	30380	30200	--	28	03/01/2008	31/01/2008	4,187	0,578
EA2.1	22800	53420	30620	28454,605	2,108	100,369	30420	30420	30300	--	28	03/01/2008	31/01/2008	3,363	0,468
EA2.2	22940	53810	30870	28686,925	2,125	101,188	30820	30780	30640	--	28	03/01/2008	31/01/2008	4,169	0,576
EA3.1	22740	53240	30500	28343,091	2,099	99,976	30180	30120	29980	--	28	03/01/2008	31/01/2008	3,882	0,537
EA3.2	22810	53080	30270	28129,356	2,084	99,222	30180	30120	29980	--	28	03/01/2008	31/01/2008	3,528	0,490
EA4.1	22820	52980	30160	28027,135	2,076	98,861	29960	29840	--	--	7	08/01/2008	15/01/2008	3,851	0,533
EA5.1	22980	53200	30220	28082,892	2,080	99,058	30100	30000	--	--	7	08/01/2008	15/01/2008	3,284	0,458
EA6.1	22980	52640	29660	27562,494	2,042	97,222	29500	29360	--	--	7	08/01/2008	15/01/2008	3,186	0,445
EA7.1	23060	53920	30860	28677,632	2,124	101,156	30660	30600	--	--	7	09/01/2008	16/01/2008	2,759	0,388
EA8.1	23060	53480	30420	28268,748	2,094	99,713	30180	30120	--	--	7	09/01/2008	16/01/2008	3,345	0,466
EA9.1	23140	54080	30940	28751,975	2,130	101,418	30760	30680	--	--	7	09/01/2008	16/01/2008	3,009	0,421
EA4.2	22920	53560	30640	28473,190	2,109	100,435	30520	30420	30140	30040	90	08/01/2008	07/04/2008	5,896	0,806
EA5.2	23040	53660	30620	28454,605	2,108	100,369	30520	30400	30160	30080	90	08/01/2008	07/04/2008	4,340	0,598
EA6.2	23140	53280	30140	28008,549	2,075	98,796	30000	29840	29580	29560	90	08/01/2008	07/04/2008	4,205	0,580
EA7.2	23000	53920	30920	28733,389	2,128	101,352	30740	30700	30580	30620	90	09/01/2008	08/04/2008	5,664	0,775
EA8.2	22920	53780	30860	28677,632	2,124	101,156	30580	30520	30400	30580	90	09/01/2008	08/04/2008	5,756	0,787
EA9.2	23000	54080	31080	28882,074	2,139	101,877	30920	30840	30720	30920	90	09/01/2008	08/04/2008	4,425	0,610

Tabla A2.16. Resultados de rotura de probetas prismáticas a flexotracción. 2ª fase (2009-2010)

Probeta n°	Peso del molde (g)	Peso del molde + muestra húmeda (g)	Peso suelo + agua	Peso suelo	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	% Densidad Proctor	Peso al quitar el molde a 1 día (g)	Peso a los 7 días (g)	Peso a los 28 días (g)	Peso a los 90 días (g)	Días de curado	Fecha de fabricación	Fecha de rotura	Carga de rotura (KN)	Tensión de rotura (MPa)
FG4.1	22800	52800	30000	27878,450	2,065	98,337	29880	29860	--	--	435	21/04/2008	30/06/2009	2,562	0,361
FG4.2	22800	53100	30300	28157,234	2,086	99,320	30180	30160	--	--	435	21/04/2008	30/06/2009	2,477	0,350
FG4.4	22740	53000	30260	28120,063	2,083	99,189	30140	30120	--	--	436	21/04/2008	01/07/2009	4,345	0,599
FG5.1	22760	52900	30140	28008,549	2,075	98,796	--	--	--	28640	104	09/07/2009	21/10/2009	2,598	0,366
FG6.1	22760	53140	30380	28231,577	2,091	99,582	--	--	--	29170	79	13/07/2009	30/09/2009	3,885	0,538
FG6.3	22800	53000	30200	28064,306	2,079	98,992	--	--	--	29850	80	14/07/2009	02/10/2009	4,858	0,667
FG6.5	22800	53840	31040	28844,903	2,137	101,746	--	--	--	30520	84	14/07/2009	06/10/2009	4,024	0,556
FG6.8	22740	52580	29840	27729,765	2,054	97,812	--	--	--	29180	100	14/07/2009	22/10/2009	1,511	0,221
FG6.10	22600	53300	30700	28528,947	2,113	100,631	--	--	--	28330	126	14/07/2009	17/11/2009	4,640	0,638
FG6.11	22740	53940	31200	28993,588	2,148	102,270	--	--	--	29140	132	14/07/2009	23/11/2009	3,311	0,461
FG6.12	22660	52220	29560	27469,566	2,035	96,894	--	--	--	27690	132	14/07/2009	23/11/2009	3,058	0,427
FG7.2	22640	52440	29800	27692,594	2,051	97,681	--	--	--	28360	147	21/07/2009	15/12/2009	3,003	0,420
FG8.2	22760	54160	31400	29179,444	2,161	102,926	--	--	--	30190	146	22/07/2009	15/12/2009	4,24	0,585
FG9.1	22860	53920	31060	28863,489	2,138	101,811	--	--	--	29900	145	23/07/2009	15/12/2009	4,901	0,673
FG9.4	22760	53320	30560	28398,848	2,104	100,172	--	--	--	29360	145	23/07/2009	15/12/2009	4,417	0,609
FG10.1	22660	52460	29800	27692,594	2,051	97,681	--	--	--	28780	119	16/12/2009	14/04/2010	4,059	0,561
FG10.4	22680	52700	30020	27897,036	2,066	98,402	--	--	--	29220	127	16/12/2009	22/04/2010	3,722	0,516
FG10.6	22740	54320	31580	29346,715	2,174	103,516	--	--	--	30780	139	16/12/2009	04/05/2010	4,858	0,667
FG11.1	22620	54420	31800	29551,157	2,189	104,237	--	--	--	30502	93	16/02/2010	20/05/2010	3,607	0,501

Tabla A2.17. Resultados de compresión de las medias probetas prismáticas rotas previamente a flexotracción

Probeta n°	Masa (g)	Longitud probeta (cm)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Días de curado	Fecha de fabricación	Fecha de rotura	Carga de rotura (KN)	Tensión de rotura (MPa)
EA1.1.a	15980	30,5	2,101	28	03/01/2008	31/01/2008	77,440	3,442
EA1.2.a	16260	31	2,106	28	03/01/2008	31/01/2008	80,870	3,594
EA2.1.a	15560	29,5	2,108	28	03/01/2008	31/01/2008	76,070	3,381
EA2.2.a	17380	32	2,125	28	03/01/2008	31/01/2008	77,490	3,444
EA3.1.a	15320	30	2,099	28	03/01/2008	31/01/2008	67,280	2,990
EA3.2.a	16340	31	2,084	28	03/01/2008	31/01/2008	67,550	3,002
EA4.1.a	17380	32	2,076	7	08/01/2008	15/01/2008	60,610	2,694
EA5.1.a	18460	36,5	2,080	7	08/01/2008	15/01/2008	44,620	1,983
EA6.1.a	17060	35	2,042	7	08/01/2008	15/01/2008	48,460	2,154
EA7.1.a	15920	30,5	2,124	7	09/01/2008	16/01/2008	59,580	2,648
EA8.1.a	15660	30,5	2,094	7	09/01/2008	16/01/2008	55,210	2,454
EA9.1.a	15820	31	2,130	7	09/01/2008	16/01/2008	48,920	2,174
EA4.2.a	14480	30,5	2,109	90	08/01/2008	07/04/2008	84,740	3,766
EA5.2.a	18340	34,5	2,108	90	08/01/2008	07/04/2008	75,250	3,344
EA6.2.a	15180	31,5	2,075	90	08/01/2008	07/04/2008	72,070	3,203
EA7.2.a	15940	31	2,128	90	09/01/2008	08/04/2008	88,810	3,947
EA8.2.a	16720	33,5	2,124	90	09/01/2008	08/04/2008	80,560	3,580
EA9.2.a	15900	29	2,139	90	09/01/2008	08/04/2008	74,630	3,317
FG4.1.a	--	--	2,065	492	21/04/2008	26/08/2009	51,140	2,273
FG4.2.a	--	--	2,086	492	21/04/2008	26/08/2009	65,150	2,896
FG4.4.a	--	--	2,083	492	21/04/2008	26/08/2009	82,110	3,649
FG5.1a	--	--	2,075	104	09/07/2009	21/10/2009	48,800	2,169
FG6.1.a	--	--	2,091	80	13/07/2009	01/10/2009	94,470	4,199
FG6.3a	--	--	2,079	83	14/07/2009	05/10/2009	97,640	4,340
FG6.5a	--	--	2,137	84	14/07/2009	06/10/2009	88,150	3,918
FG6.8a	--	--	2,054	107	14/07/2009	29/10/2009	52,040	2,313
FG6.10a	--	--	2,113	129	14/07/2009	20/11/2009	86,110	3,827
FG6.11a	--	--	2,148	181	14/07/2009	11/01/2010	110,560	4,914
FG6.12a	--	--	2,035	181	14/07/2009	11/01/2010	65,670	2,919
FG7.2a	--	--	2,051	174	21/07/2009	11/01/2010	55,460	2,465
FG8.2a	--	--	2,161	173	22/07/2009	11/01/2010	114,820	5,103
FG9.1a	--	--	2,138	172	23/07/2009	11/01/2010	104,650	4,651
FG9.4a	--	--	2,104	172	23/07/2009	11/01/2010	102,570	4,559
FG10.1a	--	--	2,051	119	16/12/2009	14/04/2010	82,420	3,663
FG10.4a	--	--	2,066	131	16/12/2009	26/04/2010	82,360	3,660
FG10.6a	--	--	2,174	139	16/12/2009	04/05/2010	99,510	4,423
FG11.1	--	--	2,189	106	16/02/2010	02/06/2010	81,000	3,600

Tabla A2.18. Resultados de rotura a tracción indirecta de las medias probetas prismáticas rotas previamente a flexotracción

Probeta n°	Masa (g)	Longitud probeta (cm)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Días de curado	Fecha de fabricación	Fecha de rotura	Carga de rotura (KN)	Tensión de rotura (MPa)
EA1.1.b	13920	26	2,101	28	03/01/2008	31/01/2008	11,540	0,327
EA1.2.b	13840	26	2,106	28	03/01/2008	31/01/2008	13,390	0,379
EA2.1.b	14340	27,5	2,108	28	03/01/2008	31/01/2008	9,400	0,266
EA2.2.b	13100	23,5	2,125	28	03/01/2008	31/01/2008	12,550	0,355
EA3.1.b	14500	28	2,099	28	03/01/2008	31/01/2008	10,320	0,292
EA3.2.b	13480	26	2,084	28	03/01/2008	31/01/2008	9,590	0,271
EA4.1.b	12340	23	2,076	7	08/01/2008	15/01/2008	11,050	0,313
EA5.1.b	11480	22	2,080	7	08/01/2008	15/01/2008	8,040	0,227
EA6.1.b	12240	25	2,042	7	08/01/2008	15/01/2008	8,540	0,242
EA7.1.b	14600	28,5	2,124	7	09/01/2008	16/01/2008	8,370	0,237
EA8.1.b	14340	27,5	2,094	7	09/01/2008	16/01/2008	8,470	0,240
EA9.1.b	14780	26,5	2,130	7	09/01/2008	16/01/2008	9,000	0,255
EA4.2.b	14480	27,5	2,109	90	08/01/2008	07/04/2008	18,380	0,520
EA5.2.b	11580	24	2,108	90	08/01/2008	07/04/2008	11,060	0,313
EA6.2.b	14280	28	2,075	90	08/01/2008	07/04/2008	14,200	0,402
EA7.2.b	14580	27	2,128	90	09/01/2008	08/04/2008	15,800	0,447
EA8.2.b	13780	26,5	2,124	90	09/01/2008	08/04/2008	14,940	0,423
EA9.2.b	14900	28,5	2,139	90	09/01/2008	08/04/2008	14,070	0,398
FG4.1.b	--	--	2,065	492	21/04/2008	26/08/2009	7,010	0,198
FG4.2.b	--	--	2,086	492	21/04/2008	26/08/2009	9,650	0,273
FG4.4.b	--	--	2,083	492	21/04/2008	26/08/2009	13,890	0,393
FG5.1b	--	--	2,075	104	09/07/2009	21/10/2009	7,390	0,209
FG6.1.b	--	--	2,091	80	13/07/2009	01/10/2009	17,260	0,488
FG6.3b	--	--	2,079	83	14/07/2009	05/10/2009	17,070	0,483
FG6.5b	--	--	2,137	84	14/07/2009	06/10/2009	16,160	0,457
FG6.8b	--	--	2,054	107	14/07/2009	29/10/2009	5,480	0,155
FG6.10b	--	--	2,113	129	14/07/2009	20/11/2009	13,920	0,394
FG6.11b	--	--	2,148	181	14/07/2009	11/01/2010	14,320	0,405
FG6.12b	--	--	2,035	181	14/07/2009	11/01/2010	6,140	0,174
FG7.2b	--	--	2,051	181	14/07/2009	11/01/2010	4,510	0,128
FG8.2b	--	--	2,161	174	21/07/2009	11/01/2010	11,110	0,314
FG9.1b	--	--	2,138	173	22/07/2009	11/01/2010	7,190	0,203
FG9.4b	--	--	2,104	172	23/07/2009	11/01/2010	15,080	0,427
FG10.1b	--	--	2,051	168	16/12/2009	02/06/2010	13,430	0,380
FG10.4b	--	--	2,066	168	16/12/2009	02/06/2010	13,400	0,379
FG10.6b	--	--	2,174	168	16/12/2009	02/06/2010	13,640	0,386
FG11.1b	--	--	2,189	106	16/02/2010	02/06/2010	10,950	0,310

Tabla A2.19. Datos de las probetas prismáticas fabricadas para ensayar a fatiga

Probeta n°	Peso del molde (g)	Peso del molde + muestra húmeda (g)	Peso suelo + agua	Peso suelo	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	% Densidad Proctor	Peso al quitar el molde a 1 día (g)	Peso a los 7 días (g)	Peso a los 28 días (g)	Peso a los 90 días (g)	Días de curado	Fecha de fabricación
FG1.1	23000	53960	30960	28770,560	2,131	101,483	31040	31000	30560	--	91	14/01/2008
FG1.2	23120	53780	30660	28491,776	2,111	100,500	30600	30540	30280	--	91	14/01/2008
FG1.3	23140	53120	29980	27859,864	2,064	98,271	29880	29800	29940	--	98	14/01/2008
FG1.4	22960	53320	30360	28212,991	2,090	99,517	30200	30080	30120	--	98	14/01/2008
FG1.5	22920	53260	30340	28194,406	2,088	99,451	30200	29880	29540	--	105	14/01/2008
FG1.6	22820	52920	30100	27971,378	2,072	98,664	29900	29700	29580	--	105	14/01/2008
FG2.1	22760	53260	30500	28343,091	2,099	99,976	30360	30210	29920	--	91	04/02/2008
FG2.2	22820	53440	30620	28454,605	2,108	100,369	30560	30450	30380	--	91	04/02/2008
FG2.3	22840	52740	29900	27785,522	2,058	98,009	29820	28700	29640	--	98	04/02/2008
FG2.4	22740	52640	29900	27785,522	2,058	98,009	29840	29650	29600	--	98	04/02/2008
FG2.5	22740	52720	29980	27859,864	2,064	98,271	29840	29760	29540	--	105	04/02/2008
FG2.6	22820	52520	29700	27599,665	2,044	97,353	29640	29520	29400	--	105	04/02/2008
FG3.1	22820	53100	30280	28138,649	2,084	99,254	30220	30020	29960	--	91	25/02/2008
FG3.2	22760	53040	30280	28138,649	2,084	99,254	30240	30200	30120	--	91	25/02/2008
FG3.3	22740	52380	29640	27543,909	2,040	97,157	29560	29400	29350	--	98	25/02/2008
FG3.4	22800	52700	29900	27785,522	2,058	98,009	29780	29730	29670	--	98	25/02/2008
FG3.5	22840	53060	30220	28082,892	2,080	99,058	30140	30090	29920	--	105	25/02/2008
FG3.6	22720	53020	30300	28157,234	2,086	99,320	30200	30170	29980	--	105	25/02/2008
FG4.3	22760	52700	29940	27822,693	2,061	98,140	29840	29820	--	--	438	21/04/2008
FG4.5	22820	53020	30200	28064,306	2,079	98,992	30060	30020	--	--	438	21/04/2008
FG4.6	22800	52660	29860	27748,351	2,055	97,878	29740	29700	--	--	438	21/04/2008
FG5.2	22640	52860	30220	28082,892	2,080	99,058	--	--	--	28760	103	09/07/2009
FG6.2	22760	53200	30440	28287,334	2,095	99,779	--	--	--	27910	79	13/07/2009
FG6.4	22780	52000	29220	27153,610	2,011	95,780	--	--	--	28770	80	14/07/2009
FG6.6	22760	52660	29900	27785,522	2,058	98,009	--	--	--	28700	84	14/07/2009
FG6.7	22760	54440	31680	29439,643	2,181	103,844	--	--	--	29680	100	14/07/2009
FG6.9	22660	53940	31280	29067,930	2,153	102,532	--	--	--	29970	126	14/07/2009

Probeta n°	Peso del molde (g)	Peso del molde + muestra húmeda (g)	Peso suelo + agua	Peso suelo	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	% Densidad Proctor	Peso al quitar el molde a 1 día (g)	Peso a los 7 días (g)	Peso a los 28 días (g)	Peso a los 90 días (g)	Días de curado	Fecha de fabricación
FG6.11	22740	53940	31200	28993,588	2,148	102,270	--	--	--	29140	132	14/07/2009
FG6.13	22720	53180	30460	28305,920	2,097	99,845	--	--	--	--	181	14/07/2009
FG6.14	22780	51660	28880	26837,654	1,988	94,665	--	--	--	28740	178	14/07/2009
FG6.15	22760	53800	31040	28844,903	2,137	101,746	--	--	--	--	181	14/07/2009
FG6.16	22700	52540	29840	27729,765	2,054	97,812	--	--	--	--	182	14/07/2009
FG7.1	22760	52780	30020	27897,036	2,066	98,402	--	--	--	--	175	21/07/2009
FG7.3	22780	54380	31600	29365,301	2,175	103,581	--	--	--	--	176	21/07/2009
FG7.4	22780	54760	31980	29718,428	2,201	104,827	--	--	--	--	176	21/07/2009
FG8.1	22800	54100	31300	29086,516	2,155	102,598	--	--	--	--	177	22/07/2009
FG8.3	22660	52780	30120	27989,964	2,073	98,730	--	--	--	--	177	22/07/2009
FG8.4	22740	54320	31580	29346,715	2,174	103,516	--	--	--	--	180	22/07/2009
FG8.5	22600	53940	31340	29123,687	2,157	102,729	--	--	--	--	180	22/07/2009
FG8.6	22640	53780	31140	28937,831	2,144	102,073	--	--	--	--	180	22/07/2009
FG9.2	22740	52720	29980	27859,864	2,064	98,271	--	--	--	--	200	23/07/2009
FG9.3	22680	52940	30260	28120,063	2,083	99,189	--	--	--	28740	182	23/07/2009
FG9.5	22780	53260	30480	28324,505	2,098	99,910	--	--	--	--	182	23/07/2009
FG9.6	22740	53780	31040	28844,903	2,137	101,746	--	--	--	--	183	23/07/2009
FG9.7	22680	52940	30260	28120,063	2,083	99,189	--	--	--	29620	196	23/07/2009
FG9.8	22760	53500	30740	28566,118	2,116	100,762	--	--	--	--	183	23/07/2009
FG9.9	22840	53200	30360	28212,991	2,090	99,517	--	--	--	28900	195	23/07/2009
FG9.10	22640	53520	30880	28696,218	2,126	101,221	--	--	--	--	200	23/07/2009
FG10.2	22740	53120	30380	28231,577	2,091	99,582	--	--	--	29690	119	16/12/2009
FG10.3	22740	53000	30260	28120,063	2,083	99,189	--	--	--	29691	127	16/12/2009
FG10.5	22680	53560	30880	28696,218	2,126	101,221	--	--	--	29692	139	16/12/2009
FG11.2	22740	53580	30840	28659,047	2,123	101,090	--	--	--	29880	93	16/02/2010
FG11.3	22640	54560	31920	29662,671	2,197	104,630	--	--	--	30450	106	16/02/2010
FG11.4	22760	54620	31860	29606,914	2,193	104,434	--	--	--	30940	108	16/02/2010

Tabla A2.20. Grupos y carga de rotura de probetas prismáticas a fatiga

Probeta nº	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Días de curado	Fecha inicio ensayo	Frecuencia (Hz)	Carga teórica	Carga inicial (KN)	Carga final (KN)	Tensión de rotura Rf (MPa)
AP7.1	2,0389	50	06/06/2008	5	G1 (50-25%)	1,299-2,598	0,940-1,960	0,69
AP7.2	2,0265	57	13/06/2008	4	G2 (65-30%)	1,54-3,26	1,02-2,30	0,69
FG1.1	2,1312	155	17/06/2008	4	G3 (80-40%)			0,69
FG1.2	2,1105	156	18/06/2008	0	G3 (80-40%)			0,69
FG1.3	2,0637	157	19/06/2008	7	G3 (80-40%)	2-4,10		0,69
FG1.4	2,0899	158	20/06/2008	7	G3 (80-40%)	2,01-4,10	2,02-4,09	0,69
FG1.5	2,0885	205	06/08/2008	7	G1 (50-25%)	1,24-2,54	1,24-2,54	0,69
FG1.6	2,0720	206	07/08/2008	7	G2 (65-30%)	1,50-3,31	1,50-3,31	0,69
FG2.1	2,0995	137	20/06/2008	7	G2 (65-30%)	1,50-3,32	1,50-3,32	0,69
FG2.2	2,1077	186	08/08/2008	7	G2 (65-30%)	1,503-3,315	1,50-3,315	0,69
FG2.3	2,0582	189	11/08/2008	7	G1 (50-25%)	1,24-2,54	1,24-2,54	0,69
FG2.4	2,0582	294	24/11/2008	7	G1 (50-25%)	1,24-2,47	1,32-2,45	0,69
FG2.5	2,0637	169	22/07/2008	7	G3 (80-40%)	2,02-4,09	2,02-4,09	0,69
FG2.6	2,0444	183	05/08/2008	7	G3 (80-40%)	2,54-3,60	2,02-4,09	0,69
FG3.1	2,0843	275	26/11/2008	7	G1 (50-25%)	1,24-2,54	1,24-2,54	0,69
FG3.2	2,0843	284	05/12/2008	7	G1 (50-25%)	1,24-2,54	1,24-2,54	0,69
FG3.3	2,0403	329	19/01/2009	7	G2 (65-30%)	1,50-3,31	1,50-3,31	0,69
FG3.4	2,0582	333	23/01/2009	7	G2 (65-30%)	1,50-3,31	1,50-3,31	0,69
FG3.5	2,0802	327	17/01/2009	7	G3 (80-40%)	2,01-4,10	2,01-4,10	0,69
FG3.6	2,0857	479	18/06/2009	7	G3 (80-40%)	1,17-3,59	0,576-3,439	0,69
FG4.3	2,0609	435	30/06/2009	7	G3 (80-40%)			0,69
FG4.5	2,0788	438	03/07/2009	7	G3 (80-40%)	2,15-4,00	2,08-4,05	0,69
FG4.6	2,0554	438	03/07/2009	7	G2 (65-30%)	1,54-3,25	1,53-3,25	0,69
FG5.2	2,0802	103	20/10/2009	7	G3 (80-40%)	0,989 -2,087	1,11-1,97	0,366
FG6.2	2,0954	79	30/09/2009	7	G3 (80-40%)	1,50-3,31	1,50-3,31	0,538
FG6.4	2,0114	80	02/10/2009	7	G2 (65-30%)	1,391-3,142	1,36-3,10	0,667
FG6.6	2,0582	84	06/10/2009	7	G3 (80-40%)	1,397-2,897	1,52-2,72	0,500

Probeta n°	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Días de curado	Fecha inicio ensayo	Frecuencia (Hz)	Carga teórica	Carga inicial (KN)	Carga final (KN)	Tensión de rotura Rf (MPa)
FG6.9	2,1532	126	17/11/2009	7	G2 (65-30%)	1,326-3,001	1,33-2,92	0,638
FG6.11	2,1477	132	23/11/2009	7	G2 (65-30%)			
FG6.13	2,0967	178	08/01/2010	7	G3 (80-40%)	2,03-3,91	3,35-3,55	0,69
FG6.14	1,9880	178	08/01/2010	7	G3 (80-40%)	1,38-2,88	1,39-2,89	0,60
FG6.15	2,1367	181	11/01/2010	7	G3 (80-40%)	--	--	0,69
FG6.16	2,0541	182	12/01/2010	7	G3 (80-40%)	--	--	0,60
FG7.1	2,0664	175	12/01/2010	7	G3 (80-40%)	2,35-2,37	2,35-2,37	0,69
FG7.3	2,1752	176	13/01/2010	7	G3 (80-40%)	2,21-3,76	2,00-3,95	0,69
FG7.4	2,2014	176	13/01/2010	7	G3 (80-40%)	2,00-3,22	1,68-3,44	0,60
FG8.1	2,1546	177	15/01/2010	7	G3 (80-40%)	2,43-3,50	2,43-3,73	0,69
FG8.3	2,0733	177	15/01/2010	7	G3 (80-40%)	2,30-3,70	2,37-3,54	0,69
FG8.4	2,1738	180	18/01/2010	7	G3 (80-40%)	2,77-2,96	1,65-3,44	0,60
FG8.5	2,1573	180	18/01/2010	7	G3 (80-40%)	2,28-3,69	2,02-4,01	0,69
FG8.6	2,1435	180	18/01/2010	7	G3 (80-40%)	2,06-3,16	1,80-3,21	0,60
FG9.2	2,0637	200	08/02/2010	7	G2 (65-30%)	1,23-2,70	1,24-2,74	0,60
FG9.3	2,0830	182	21/01/2010	7	G3 (80-40%)	2,46-3,47	2,06-3,98	0,69
FG9.5	2,0981	182	21/01/2010	7	G3 (80-40%)	1,98-3,77	1,98-3,77	0,69
FG9.6	2,1367	183	22/01/2010	7	G3 (80-40%)	1,67-3,31	1,70-3,46	0,60
FG9.7	2,0830	195	03/02/2010	7	G2 (65-30%)	1,36-3,08	1,45-3,17	0,69
FG9.8	2,1160	183	22/01/2010	7	G3 (80-40%)	2,02-3,09	1,71-3,43	0,60
FG9.9	2,0899	194	02/02/2010	7	G2 (65-30%)	1,32-3,05	1,47-3,19	0,69
FG9.10	2,1256	196	04/02/2010	7	G2 (65-30%)	1,25-2,72	1,24-2,73	0,60
FG10.2	2,0912	119	14/04/2010	7	G2 (65-30%)	1,17-2,61	1,18-2,62	0,561
FG10.3	2,0830	127	22/04/2010	7	G2 (65-30%)	1,10-2,45	1,12-2,47	0,538
FG10.5	2,1256	139	04/05/2010	7	G2 (65-30%)	1,42-3,05	1,51-3,08	0,667
FG11.2	2,1229	93	20/05/2010	8	G2 (65-30%)	1,16-2,80	1,27-2,69	0,60
FG11.3	2,1972	106	02/06/2010	9	G3 (80-40%)	1,78-3,43	1,73-3,43	0,60
FG11.4	2,1931	108	04/06/2010	10	G2 (65-30%)	1,31-2,73	1,34-2,76	0,60

Tabla A2.21. Resultados del ensayo a fatiga de probetas prismáticas (numero de ciclos)

Probeta nº	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Días de curado	Carga teórica	Tensión de rotura Rf (MPa)	Tiempo (h)	Desplazamiento inicial (mm)	Desplazamiento final (mm)	Nº de ciclos
AP7.1	2,0389	50	G1 (50-25%)	0,69	180,56			3.250.000
AP7.2	2,0265	57	G2 (65-30%)	0,69	93,06			1.340.000
FG1.1	2,1312	155	G3 (80-40%)		0,01			74
FG1.2	2,1105	156	G3 (80-40%)		0,00			0 (en carga)
FG1.3	2,0637	157	G3 (80-40%)	0,69	4,15			104.534
FG1.4	2,0899	158	G3 (80-40%)	0,69	0,53	40,809-40,977	40,842-40,974	13.473
FG1.5	2,0885	205	G1 (50-25%)	0,69	20,29	40,486-40,587	40,571-40,674	511.365
FG1.6	2,0720	206	G2 (65-30%)	0,69	0,28	41,536-41,661	41,563-41,687	7.042
FG2.1	2,0995	137	G2 (65-30%)	0,69	201,59	40,199-40,315	40,336-40,467	5.080.000
FG2.2	2,1077	186	G2 (65-30%)	0,69	43,57	40,336-40,451	40,395-40,512	1.097.880
FG2.3	2,0582	189	G1 (50-25%)	0,69	740,04	40,043-40,125	40,157-40,157	18.648.940
FG2.4	2,0582	294	G1 (50-25%)	0,69	11,85	41,472-41,576	41,123-41,232	298.501
FG2.5	2,0637	169	G3 (80-40%)	0,69	99,81	40,724-40,857	40,802-40,954	2.515.244
FG2.6	2,0444	183	G3 (80-40%)	0,69	0,13	41,6498-41,839	41,701-41,834	3.217
FG3.1	2,0843	275	G1 (50-25%)	0,69	209,74	40,484-40,55	51,404-51,476	5.285.353
FG3.2	2,0843	284	G1 (50-25%)	0,69	455,85	51,001-51,078	51,044-51,159	11.487.356
FG3.3	2,0403	329	G2 (65-30%)	0,69	0,92	51,587-51,677	50,678-50,806	23.157
FG3.4	2,0582	333	G2 (65-30%)	0,69	455,42	51,940-52,076	51,935-52,086	11.476.510
FG3.5	2,0802	327	G3 (80-40%)	0,69	865,05	50,628-50,784	50,826-50,951	21.799.325
FG3.6	2,0857	479	G3 (80-40%)	0,69	0,05	40,684-40,855	40,603-40,848	1.357
FG4.3	2,0609	435	G3 (80-40%)	0,69				0 (en carga)
FG4.5	2,0788	438	G3 (80-40%)	0,69	0,40	49,702-49,831	49,808-49,942	10.108
FG4.6	2,0554	438	G2 (65-30%)	0,69	0,08	50,683-50,804	50,689-50,807	2.011
FG5.2	2,0802	103	G3 (80-40%)	0,366	0,03	48,563-48,661	48,554-48,610	868
FG6.2	2,0954	79	G3 (80-40%)	0,538	0,51	41,543-41,667	48,788-48,900	12.884
FG6.4	2,0114	80	G2 (65-30%)	0,667	1,37	48,560-48,693	48,590-48,711	34.589
FG6.6	2,0582	84	G3 (80-40%)	0,5	0,06	48,398-48,399	48,316-48,412	1.561

Probeta n°	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Días de curado	Carga teórica	Tensión de rotura Rf (MPa)	Tiempo (h)	Desplazamiento inicial (mm)	Desplazamiento final (mm)	N° de ciclos
FG6.9	2,1532	126	G2 (65-30%)	0,638	16,91	48,477-48,574	48,527-48,623	426.140
FG6.11	2,1477	132	G2 (65-30%)	0,69	519,71			13.096.690
FG6.13	2,0967	178	G3 (80-40%)	0,69	2,35	49,139-49,249	49,190-49,201	59.306
FG6.14	1,9880	178	G3 (80-40%)	0,6	83,49	50,273-50,369	50,419-50,513	2.103.978
FG6.15	2,1367	181	G3 (80-40%)	0,69	0,00	--	--	42
FG6.16	2,0541	182	G3 (80-40%)	0,6	0,00	--	--	74
FG7.1	2,0664	175	G3 (80-40%)	0,69	0,00	49,549-49,561	49,559-49,637	48
FG7.3	2,1752	176	G3 (80-40%)	0,69	0,00	50,184-50,274	50,212-50,325	123
FG7.4	2,2014	176	G3 (80-40%)	0,6	0,05	49,175-49,255	49,254-49,358	1.245
FG8.1	2,1546	177	G3 (80-40%)	0,69	0,60	49,881-49,933	49,880-49,955	15.179
FG8.3	2,0733	177	G3 (80-40%)	0,69	0,04	50,796-50,880	50,893-50,968	1.126
FG8.4	2,1738	180	G3 (80-40%)	0,6	10,09	50,153-50,164	50,186-50,308	254.205
FG8.5	2,1573	180	G3 (80-40%)	0,69	0,04	50,116-50,197	50,196-50,322	1.052
FG8.6	2,1435	180	G3 (80-40%)	0,6	0,11	48,407-48,504	48,515-48,606	2.849
FG9.2	2,0637	200	G2 (65-30%)	0,6	0,86	49,249-49,345	49,277-49,381	21.555
FG9.3	2,0830	182	G3 (80-40%)	0,69	0,01	49,593-49,683	49,560-49,671	129
FG9.5	2,0981	182	G3 (80-40%)	0,69	0,00	50,368-50,439	50,368-50,439	64
FG9.6	2,1367	183	G3 (80-40%)	0,6	0,30	48,663-48,760	48,684-48-784	7.567
FG9.7	2,0830	195	G2 (65-30%)	0,69	2,79	49,156-49,256	49,163-49,262	70.348
FG9.8	2,1160	183	G3 (80-40%)	0,6	0,06	49,425-49,503	49,470-49,574	1.579
FG9.9	2,0899	194	G2 (65-30%)	0,69	11,62	49,892-49,999	49,815-49,926	292.855
FG9.10	2,1256	196	G2 (65-30%)	0,6	72,15	49,761-49,848	49,857-49,951	1.818.254
FG10.2	2,0912	119	G2 (65-30%)	0,561	95,41	49,742-49,841	49,851-49,947	2.404.230
FG10.3	2,0830	127	G2 (65-30%)	0,5385	253,97	48,391-48,489	48,671-48,760	6.400.000
FG10.5	2,1256	139	G2 (65-30%)	0,669	96,51	49,436-49,542	49,478-49,576	2.432.106
FG11.2	2,1229	93	G2 (65-30%)	0,6	7,55	50,088-50,187	50,070-50,155	217.296
FG11.3	2,1972	106	G3 (80-40%)	0,6	1,27	48,061-48,187	48,068-48,190	41.102
FG11.4	2,1931	108	G2 (65-30%)	0,6	1,97	49,648-49,771	49,619-49,731	70.943

Tabla A2.22. Resultados de compresión de las medias probetas prismáticas rotas previamente a fatiga

Probeta nº	Masa (g)	Longitud probeta (cm)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Días de curado	Edad media (días)	Fecha de fabricación	Fecha de rotura	Carga de rotura (KN)	Tensión de rotura (MPa)	Tensión Media (MPa)	
FG6.2a	--	--	2,095	79	90	13/07/2009	30/09/2009	ERROR	--	2,604	
FG6.4a	--	--	2,011	83		14/07/2009	05/10/2009	63,310	2,814		
FG1.1.a	--	--	2,131	90							
FG1.2.a	--	--	2,111	90							
FG6.6a	--	--	2,058	92	109	14/07/2009	14/10/2009	53,860	2,394	3,270	
FG5.2a	--	--	2,080	104		09/07/2009	21/10/2009	64,390	2,862		
FG11.2a	--	--	2,123	106		16/02/2010	02/06/2010	82,510	3,667		
FG6.7a	--	--	2,181	107		14/07/2009	29/10/2009	47,160	2,096		
FG11.3a	--	--	2,197	113		16/02/2010	09/06/2010	38,590	1,715		
FG11.4a	--	--	2,193	113		16/02/2010	09/06/2010	100,270	4,456		
FG10.3a	--	--	2,083	127	144	16/12/2009	22/04/2010	76,360	3,394	3,805	
FG6.9a	--	--	2,153	129		14/07/2009	20/11/2009	98,640	4,384		
FG10.2a	--	--	2,091	131		16/12/2009	26/04/2010	78,930	3,508		
FG10.5a	--	--	2,126	149		16/12/2009	14/05/2010	87,850	3,904		
FG1.3.a	15340	30	2,064	165		14/01/2008	27/06/2008	82,330	3,659		
FG1.4.a	15620	30,5	2,090	165		14/01/2008	27/06/2008	89,600	3,982		
FG8.1a	--	--	2,155	180		22/07/2009	18/01/2010	111,300	4,947		4,630
FG8.3a	--	--	2,073	180		22/07/2009	18/01/2010	106,830	4,748		
FG8.4a	--	--	2,174	180	22/07/2009	18/01/2010	129,890	5,773			
FG8.6a	--	--	2,144	180	22/07/2009	18/01/2010	92,850	4,127			
FG7.1a	--	--	2,066	181	21/07/2009	18/01/2010	79,160	3,518			
FG7.3a	--	--	2,175	181	21/07/2009	18/01/2010	107,960	4,798			
FG7.4a	--	--	2,201	181	21/07/2009	18/01/2010	101,200	4,498			
FG9.3a	--	--	2,083	186	23/07/2009	25/01/2010	106,930	4,752			
FG9.5a	--	--	2,098	186	187	23/07/2009	25/01/2010	100,320	4,459	4,083	
FG9.6a	--	--	2,137	186		23/07/2009	25/01/2010	111,410	4,952		
FG9.8a	--	--	2,116	186		23/07/2009	25/01/2010	110,130	4,895		

Probeta n°	Masa (g)	Longitud probeta (cm)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Días de curado	Edad media (días)	Fecha de fabricación	Fecha de rotura	Carga de rotura (kN)	Tensión de rotura (MPa)	Tensión Media (MPa)
FG8.5a	--	--	2,157	187		22/07/2009	25/01/2010	96,090	4,271	
FG6.13a	--	--	2,097	188		14/07/2009	18/01/2010	88,210	3,920	
FG6.14a	--	--	1,988	188		14/07/2009	18/01/2010	60,550	2,691	
FG6.15a	--	--	2,137	188		14/07/2009	18/01/2010	61,310	2,725	
FG6.16a	--	--	2,054	188		14/07/2009	18/01/2010	23,200	1,031	
FG9.2a	--	--	2,064	204		23/07/2009	12/02/2010	77,720	3,454	
FG9.7a	--	--	2,083	204	204	23/07/2009	12/02/2010	97,050	4,313	4,340
FG9.9a	--	--	2,090	204		23/07/2009	12/02/2010	107,340	4,771	
FG9.10a	--	--	2,126	204		23/07/2009	12/02/2010	108,490	4,822	
FG2.1.a	--	--	2,099	301		04/02/2008	01/12/2008	97,700	4,342	
FG2.2.a	--	--	2,108	301		04/02/2008	01/12/2008	97,670	4,341	
FG2.3.a	--	--	2,058	301	302	04/02/2008	01/12/2008	97,690	4,342	4,487
FG2.4.a	12525	--	2,058	303		04/02/2008	03/12/2008	97,880	4,350	
FG2.5.a	12712	--	2,064	303		04/02/2008	03/12/2008	108,780	4,835	
FG2.6.a	11761	--	2,044	303		04/02/2008	03/12/2008	106,020	4,712	
FG1.5.a	--	--	2,088	322	322	14/01/2008	01/12/2008	87,570	3,892	4,054
FG1.6.a	--	--	2,072	322		14/01/2008	01/12/2008	94,840	4,215	
FG3.1.a	13066	--	2,084	394		25/02/2008	25/03/2009	138,590	6,160	
FG3.2.a	10597	--	2,084	394		25/02/2008	25/03/2009	131,320	5,836	
FG3.3.a	10417	--	2,040	394	394	25/02/2008	25/03/2009	97,080	4,315	5,172
FG3.4.a	13925	--	2,058	394		25/02/2008	25/03/2009	119,140	5,295	
FG3.5.a	14608	--	2,080	400		25/02/2008	31/03/2009	95,730	4,255	
FG4.3.a	--	--	2,061	492	492	21/04/2008	26/08/2009	92,290	4,102	
FG4.5.a	--	--	2,079	492	492	21/04/2008	26/08/2009	94,170	4,185	4,128
FG4.6.a	--	--	2,055	492		21/04/2008	26/08/2009	92,210	4,098	
FG3.6.a	--	--	2,086	548	548	25/02/2008	26/08/2009	99,770	4,434	4,434
FG6.11a	--	--					--			

Tabla A2.23. Resultados de rotura a tracción indirecta de las medias probetas prismáticas rotas a fatiga

Probeta n°	Masa (g)	Longitud probeta (cm)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Días de curado	Edad media (días)	Fecha de fabricación	Fecha de rotura	Carga de rotura (KN)	Tensión de rotura (MPa)	Tensión Media (MPa)	
FG6.2b	--	--	2,095	79	90	13/07/2009	30/09/2009	11,220	0,317	0,315	
FG6.4b	--	2,011	83	14/07/2009		05/10/2009	10,400	0,294			
FG1.1.b	--	2,131	90	00/01/1900							
FG1.2.b	--	2,111	90	00/01/1900							
FG6.6b	--	--	2,058	92	109	14/07/2009	14/10/2009	11,780	0,333	0,329	
FG5.2b	--	--	2,080	104		09/07/2009	21/10/2009	8,710	0,246		
FG11.2b	--	--	2,123	106		16/02/2010	02/06/2010	11,890	0,336		
FG6.7b	--	--	2,181	107		14/07/2009	29/10/2009	1,150	0,033		
FG11.3b	--	--	2,197	113		16/02/2010	09/06/2010	15,830	0,448		
FG11.4b	--	--	2,193	113		16/02/2010	09/06/2010	10,060	0,285		
FG6.9b	--	--	2,153	129		14/07/2009	20/11/2009	14,380	0,407		
FG10.2b	--	--	2,091	131		16/12/2009	26/04/2010	15,440	0,437		
FG10.3b	--	--	2,083	139		16/12/2009	04/05/2010	10,690	0,302		
FG10.5b	--	--	2,126	149		16/12/2009	14/05/2010	12,300	0,348		
FG1.3.b	13280	26,5	2,064	165	165	14/01/2008	27/06/2008	15,340	0,434	0,445	
FG1.4.b	13460	26	2,090	165		14/01/2008	27/06/2008	16,100	0,456		
FG6.11b	--	--	0,000	181		14/07/2009	11/01/2010	14,320	0,405		
FG9.3b	--	--	2,083	186		23/07/2009	25/01/2010	11,840	0,335		
FG9.5b	--	--	2,098	186	186	23/07/2009	25/01/2010	1,860	0,053	0,358	
FG9.6b	--	--	2,137	186		23/07/2009	25/01/2010	4,590	0,130		
FG9.8b	--	--	2,116	186		23/07/2009	25/01/2010	8,930	0,253		
FG8.5b	--	--	2,157	187		22/07/2009	25/01/2010	13,080	0,370		
FG8.3b	--	--	2,073	187		22/07/2009	25/01/2010	17,610	0,498		
FG8.4b	--	--	2,174	187		22/07/2009	25/01/2010	15,940	0,451		
FG7.3b	--	--	2,175	188		21/07/2009	25/01/2010	8,860	0,251		
FG7.4b	--	--	2,201	188		21/07/2009	25/01/2010	10,580	0,299		
FG8.6b	--	--	2,144	196		196	14/07/2009	03/02/2010	13,560		0,384
FG8.1b	--	--	2,155	196			14/07/2009	03/02/2010	12,320		0,349

Probeta n°	Masa (g)	Longitud probeta (cm)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Días de curado	Edad media (días)	Fecha de fabricación	Fecha de rotura	Carga de rotura (KN)	Tensión de rotura (MPa)	Tensión Media (MPa)
FG7.1b	--	--	2,066	197		22/07/2009	03/02/2010	15,460	0,437	
FG6.13b	--	--	2,097	204		22/07/2009	03/02/2010	13,810	0,391	
FG6.14b	--	--	1,988	204		21/07/2009	03/02/2010	10,220	0,289	
FG6.15b	--	--	2,137	204		14/07/2009	03/02/2010	7,850	0,222	
FG6.16b	--	--	2,054	204	204	14/07/2009	03/02/2010	7,600	0,215	0,406
FG9.2b	--	--	2,064	204		23/07/2009	12/02/2010	14,550	0,412	
FG9.7b	--	--	2,083	204		23/07/2009	12/02/2010	16,550	0,468	
FG9.9b	--	--	2,090	204		23/07/2009	12/02/2010	14,690	0,416	
FG9.10b	--	--	2,126	204		23/07/2009	12/02/2010	16,210	0,459	
FG2.1.b	16666	--	2,099	301		04/02/2008	01/12/2008	19,110	0,541	
FG2.2.b	16794	--	2,108	301		04/02/2008	01/12/2008	16,710	0,473	
FG2.3.b	14768	--	2,058	301	302	04/02/2008	01/12/2008	13,260	0,375	0,498
FG2.4.b	15330	--	2,058	303		04/02/2008	03/12/2008	16,440	0,465	
FG2.5.b	15155	--	2,064	303		04/02/2008	03/12/2008	14,430	0,408	
FG2.6.b	15937	--	2,044	303		04/02/2008	03/12/2008	25,740	0,728	
FG1.5.b	--	--	2,088	322	322	14/01/2008	01/12/2008	11,190	0,317	0,341
FG1.6.b	--	--	2,072	322		14/01/2008	01/12/2008	12,900	0,365	
FG3.1.b	15457	--	2,084	394		25/02/2008	25/03/2009	17,320	0,490	
FG3.2.b	17984	--	2,084	394	394	25/02/2008	25/03/2009	14,800	0,419	0,424
FG3.3.b	17198	--	2,040	394		25/02/2008	25/03/2009	14,240	0,403	
FG3.4.b	14176	--	2,058	394		25/02/2008	25/03/2009	11,350	0,321	
FG3.5.b	13990	--	2,080	400		25/02/2008	31/03/2009	17,140	0,485	
FG4.3.b	--	--	2,061	492		21/04/2008	26/08/2009	11,220	0,317	
FG4.5.b	--	--	2,079	492	492	21/04/2008	26/08/2009	15,740	0,445	0,381
FG4.6.b	--	--	2,055	492		21/04/2008	26/08/2009	8,160	0,231	
FG3.6.b	--	--	2,086	548	548	25/02/2008	26/08/2009	8,860	0,251	

Tabla A2.24. Calculo de la pendiente de la ley de fatiga obtenida de los resultados obtenidos en los ensayos de fatiga

Probeta n°	número de ciclos	N millones de ciclos	y = $\sigma/R_f$	x = $\log N$	Coeficientes ecuación		
					a2	a	coefic. Independ.
AP7.1	3.250.000	3,250000	0,50	6,51	3,2559	42,1546	-3,2559
AP7.2	1.340.000	1,340000	0,65	6,13	2,1445	37,4189	-2,1445
FG1.1	74	0,000074	0,80	1,87	0,3738	3,4540	-0,3738
FG1.2	0						
FG1.3	104.534	0,104534	0,80	5,02	1,0039	25,1529	-1,0039
FG1.4	13.473	0,013473	0,80	4,13	0,8259	17,0125	-0,8259
FG1.5	511.365	0,511365	0,50	5,71	2,8544	32,3396	-2,8544
FG1.6	7.042	0,007042	0,65	3,85	1,3467	14,6823	-1,3467
FG2.1	5.080.000	5,080000	0,65	6,71	2,3471	44,8461	-2,3471
FG2.2	1.097.880	1,097880	0,65	6,04	2,1142	36,3658	-2,1142
FG2.3	18.648.940	18,648940	0,50	7,27	3,6353	52,6124	-3,6353
FG2.4	298.501	0,298501	0,50	5,47	2,7375	29,7250	-2,7375
FG2.5	2.515.244	2,515244	0,80	6,40	1,2801	40,9274	-1,2801
FG2.6	3.217	0,003217	0,80	3,51	0,7015	12,2622	-0,7015
FG3.1	5.285.353	5,285353	0,50	6,72	3,3615	44,9497	-3,3615
FG3.2	11.487.356	11,487356	0,50	7,06	3,5301	49,5967	-3,5301
FG3.3	23.157	0,023157	0,65	4,36	1,5276	18,9280	-1,5276
FG3.4	11.476.510	11,476510	0,65	7,06	2,4709	49,7184	-2,4709
FG3.5	21.799.325	21,799325	0,80	7,34	1,4677	53,8127	-1,4677
FG3.6	1.357	0,001357	0,80	3,13	0,6265	9,7731	-0,6265
FG4.3	0						
FG4.5	10.108	0,010108	0,80	4,00	0,8009	15,9973	-0,8009
FG4.6	2.011	0,002011	0,65	3,30	1,1562	10,7900	-1,1562
FG5.2	868	0,000868	0,80	2,94	0,5877	8,5949	-0,5877
FG6.2	12.884	0,012884	0,80	4,11	0,8220	16,8525	-0,8220
FG6.4	34.589	0,034589	0,65	4,54	1,5886	20,4795	-1,5886
FG6.6	1.561	0,001561	0,80	3,19	0,6387	10,1578	-0,6387
FG6.7	2.913	0,002913	0,80	3,46	0,6929	11,9617	-0,6929
FG6.9	426.140	0,426140	0,65	5,63	1,9703	31,5694	-1,9703
FG6.11	13.096.690	13,096690	0,65	7,12	2,4910	50,5315	-2,4910
FG6.13	59.306	0,059306	0,80	4,77	0,9546	22,7425	-0,9546
FG6.14	2.103.978	2,103978	0,80	6,32	1,2646	39,9408	-1,2646
FG6.15	42	0,000042	0,80	1,62	0,3246	2,5949	-0,3246
FG6.16	74	0,000074	0,80	1,87	0,3738	3,4540	-0,3738
FG7.1	48	0,000048	0,80	1,68	0,3362	2,7866	-0,3362
FG7.3	123	0,000123	0,80	2,09	0,4180	4,3277	-0,4180
FG7.4	1.245	0,001245	0,80	3,10	0,6190	9,5401	-0,6190
FG8.1	15.179	0,015179	0,80	4,18	0,8362	17,4428	-0,8362
FG8.3	1.126	0,001126	0,80	3,05	0,6103	9,2719	-0,6103
FG8.4	254.205	0,254205	0,80	5,41	1,0810	29,1760	-1,0810
FG8.5	1.052	0,001052	0,80	3,02	0,6044	9,0926	-0,6044
FG8.6	2.849	0,002849	0,80	3,45	0,6909	11,8949	-0,6909
FG9.2	21.555	0,021555	0,65	4,33	1,5167	18,6571	-1,5167
FG9.3	129	0,000129	0,80	2,11	0,4221	4,4146	-0,4221
FG9.5	64	0,000064	0,80	1,81	0,3612	3,2223	-0,3612
FG9.6	7.567	0,007567	0,80	3,88	0,7758	15,0060	-0,7758
FG9.7	70.348	0,070348	0,65	4,85	1,6965	23,3733	-1,6965
FG9.8	1.579	0,001579	0,80	3,20	0,6397	10,1896	-0,6397
FG9.9	292.855	0,292855	0,65	5,47	1,9133	29,7618	-1,9133
FG9.10	1.818.254	1,818254	0,65	6,26	2,1909	39,0608	-2,1909
FG10.2	2.404.230	2,404230	0,65	6,38	2,2333	40,5944	-2,2333
FG10.3	6.400.000	6,400000	0,65	6,81	2,3822	46,2016	-2,3822
FG10.5	2.432.106	2,432106	0,65	6,39	2,2351	40,6583	-2,2351
FG11.2	217.296	0,217296	0,65	5,34	1,8680	28,3616	-1,8680
FG11.3	41.102	0,041102	0,80	4,61	0,9228	21,2477	-0,9228
FG11.4	70.943	0,070943	0,65	4,85	1,6978	23,4088	-1,6978
punto fijo	1	0,000001	1,00	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
suma =					77,3229	1299,0899	-77,3229
					a = 0,05931144		

Tabla A2.25. Calculo de la pendiente de la ley de fatiga obtenida de los resultados obtenidos en los ensayos de fatiga corregidos

Probeta nº	número de ciclos	N millones de ciclos	$y = \sigma/R_f$	$x = \log N$	Coeficientes ecuación		
					a2	a	coefic. Independ.
AP7.1	3.250.000	3,250000	0,50	6,51	3,2559	42,1546	-3,2559
AP7.2	1.340.000	1,340000	0,65	6,13	2,1445	37,4189	-2,1445
FG1.1	74	0,000074	0,80	1,87	0,3738	3,4540	-0,3738
FG1.2	0						
FG1.3	104.534	0,104534	0,80	5,02	1,0039	25,1529	-1,0039
FG1.4	13.473	0,013473	0,80	4,13	0,8259	17,0125	-0,8259
FG1.5	511.365	0,511365	0,50	5,71	2,8544	32,3396	-2,8544
FG1.6	7.042	0,007042	0,65	3,85	1,3467	14,6823	-1,3467
FG2.1	5.080.000	5,080000	0,65	6,71	2,3471	44,8461	-2,3471
FG2.2	1.097.880	1,097880	0,65	6,04	2,1142	36,3658	-2,1142
FG2.3	18.648.940	18,648940	0,50	7,27	3,6353	52,6124	-3,6353
FG2.4	298.501	0,298501	0,50	5,47	2,7375	29,7250	-2,7375
FG2.5	2.515.244	2,515244	0,80	6,40	1,2801	40,9274	-1,2801
FG2.6	3.217	0,003217	0,80	3,51	0,7015	12,2622	-0,7015
FG3.1	5.285.353	5,285353	0,50	6,72	3,3615	44,9497	-3,3615
FG3.2	11.487.356	11,487356	0,50	7,06	3,5301	49,5967	-3,5301
FG3.3	23.157	0,023157	0,65	4,36	1,5276	18,9280	-1,5276
FG3.4	11.476.510	11,476510	0,65	7,06	2,4709	49,7184	-2,4709
FG3.5	21.799.325	21,799325	0,80	7,34	1,4677	53,8127	-1,4677
FG3.6	1.357	0,001357	0,80	3,13	0,6265	9,7731	-0,6265
FG4.3	0						
FG4.5	10.108	0,010108	0,92	4,00	0,3204	16,0309	-0,3204
FG4.6	2.011	0,002011	0,75	3,30	0,8259	10,8500	-0,8259
FG5.2	868	0,000868	0,80	2,94	0,5877	8,5949	-0,5877
FG6.2	12.884	0,012884	0,80	4,11	0,8220	16,8525	-0,8220
FG6.4	34.589	0,034589	0,65	4,54	1,5886	20,4795	-1,5886
FG6.6	1.561	0,001561	0,72	3,19	0,8942	10,1194	-0,8942
FG6.7	2.913	0,002913					
FG6.9	426.140	0,426140	0,65	5,63	1,9703	31,5694	-1,9703
FG6.11	13.096.690	13,096690	0,65	7,12	2,4910	50,5315	-2,4910
FG6.13	59.306	0,059306	0,80	4,77	0,9546	22,7425	-0,9546
FG6.14	2.103.978	2,103978	0,80	6,32	1,2646	39,9408	-1,2646
FG6.15	42	0,000042	0,80	1,62	0,3246	2,5949	-0,3246
FG6.16	74	0,000074	0,80	1,87	0,3738	3,4540	-0,3738
FG7.1	48	0,000048	0,98	1,68	0,0336	2,8262	-0,0336
FG7.3	123	0,000123	0,80	2,09	0,4180	4,3277	-0,4180
FG7.4	1.245	0,001245	0,80	3,10	0,6190	9,5401	-0,6190
FG8.1	15.179	0,015179	0,94	4,18	0,2509	17,4792	-0,2509
FG8.3	1.126	0,001126	0,80	3,05	0,6103	9,2719	-0,6103
FG8.4	254.205	0,254205	0,80	5,41	1,0810	29,1760	-1,0810
FG8.5	1.052	0,001052	0,80	3,02	0,6044	9,0926	-0,6044
FG8.6	2.849	0,002849	0,80	3,45	0,6909	11,8949	-0,6909
FG9.2	21.555	0,021555	0,58	4,33	1,8201	18,6032	-1,8201
FG9.3	129	0,000129	0,80	2,11	0,4221	4,4146	-0,4221
FG9.5	64	0,000064	0,91	1,81	0,1626	3,2542	-0,1626
FG9.6	7.567	0,007567	0,80	3,88	0,7758	15,0060	-0,7758
FG9.7	70.348	0,070348	0,65	4,85	1,6965	23,3733	-1,6965
FG9.8	1.579	0,001579	0,80	3,20	0,6397	10,1896	-0,6397
FG9.9	292.855	0,292855	0,65	5,47	1,9133	29,7618	-1,9133
FG9.10	1.818.254	1,818254	0,65	6,26	2,1909	39,0608	-2,1909
FG10.2	2.404.230	2,404230	0,65	6,38	2,2333	40,5944	-2,2333
FG10.3	6.400.000	6,400000	0,65	6,81	2,3822	46,2016	-2,3822
FG10.5	2.432.106	2,432106	0,65	6,39	2,2351	40,6583	-2,2351
FG11.2	217.296	0,217296	0,78	5,34	1,1742	28,4357	-1,1742
FG11.3	41.102	0,041102	0,80	4,61	0,9228	21,2477	-0,9228
FG11.4	70.943	0,070943	0,65	4,85	1,6978	23,4088	-1,6978
punto fijo	1	0,000001	1,00	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
suma =					74,5975	1287,3115	-74,5975
					a = 0,05775497		

Tabla A2.26. Calculo de la pendiente de la ley de fatiga obtenida de las Rf estimadas según relación lineal (formula [2]) de las Rc medidas en los semiprismas ensayados

Probeta nº	número de ciclos	N millones de ciclos	y = σ/Rf	x = logN	Coeficientes ecuación			
					a2	a	coefic. Independ.	
AP7.1	3.250.000	3,250000		6,51				
AP7.2	1.340.000	1,340000		6,13				
FG1.1	74	0,000074						
FG1.2	0							
FG1.3	104.534	0,104534	0,96	5,02	0,2171	25,1911	-0,2171	
FG1.4	13.473	0,013473	0,90	4,13	0,4086	17,0427	-0,4086	
FG1.5	511.365	0,511365	0,57	5,71	2,4408	32,4068	-2,4408	
FG1.6	7.042	0,007042	0,70	3,85	1,1443	14,7163	-1,1443	
FG2.1	5.080.000	5,080000	0,69	6,71	2,0955	44,8710	-2,0955	
FG2.2	1.097.880	1,097880	0,69	6,04	1,8869	36,3907	-1,8869	
FG2.3	18.648.940	18,648940	0,53	7,27	3,4254	52,6404	-3,4254	
FG2.4	298.501	0,298501	0,53	5,47	2,5835	29,7524	-2,5835	
FG2.5	2.515.244	2,515244	0,78	6,40	1,4015	40,9195	-1,4015	
FG2.6	3.217	0,003217	0,80	3,51	0,7145	12,2607	-0,7145	
FG3.1	5.285.353	5,285353	0,40	6,72	4,0039	44,8450	-4,0039	
FG3.2	11.487.356	11,487356	0,42	7,06	4,0801	49,5127	-4,0801	
FG3.3	23.157	0,023157	0,69	4,36	1,3500	18,9548	-1,3500	
FG3.4	11.476.510	11,476510	0,59	7,06	2,8803	49,6745	-2,8803	
FG3.5	21.799.325	21,799325	0,86	7,34	1,0358	53,8328	-1,0358	
FG3.6	1.357	0,001357	0,83	3,13	0,5226	9,7852	-0,5226	
FG4.3	0		0,88					
FG4.5	10.108	0,010108	0,87	4,00	0,5238	16,0202	-0,5238	
FG4.6	2.011	0,002011	0,72	3,30	0,9346	10,8325	-0,9346	
FG5.2	868	0,000868	0,60	2,94	1,1788	8,4740	-1,1788	
FG6.2	12.884	0,012884		4,11				
FG6.4	34.589	0,034589	0,90	4,54	0,4701	20,5912	-0,4701	
FG6.6	1.561	0,001561	0,91	3,19	0,2722	10,1906	-0,2722	
FG6.7	2.913	0,002913	0,44	3,46	1,9498	11,6849	-1,9498	
FG6.9	426.140	0,426140	0,63	5,63	2,0761	31,5559	-2,0761	
FG6.13	59.306	0,059306	0,91	4,77	0,4240	22,7746	-0,4240	
FG6.14	2.103.978	2,103978						
FG6.15	42	0,000042						
FG6.16	74	0,000074						
FG7.1	48	0,000048	0,98	1,68	0,0282	2,8263	-0,0282	
FG7.3	123	0,000123	0,79	2,09	0,4483	4,3217	-0,4483	
FG7.4	1.245	0,001245	0,72	3,10	0,8763	9,4999	-0,8763	
FG8.1	15.179	0,015179	0,77	4,18	0,9717	17,4288	-0,9717	
FG8.3	1.126	0,001126	0,79	3,05	0,6354	9,2685	-0,6354	
FG8.4	254.205	0,254205	0,59	5,41	2,2034	29,0498	-2,2034	
FG8.5	1.052	0,001052	0,86	3,02	0,4337	9,1120	-0,4337	
FG8.6	2.849	0,002849	0,76	3,45	0,8166	11,8790	-0,8166	
FG9.2	21.555	0,021555	0,70	4,33	1,2848	18,6917	-1,2848	
FG9.3	129	0,000129	0,79	2,11	0,4407	4,4110	-0,4407	
FG9.5	64	0,000064	0,83	1,81	0,3074	3,2333	-0,3074	
FG9.6	7.567	0,007567	0,67	3,88	1,2917	14,9352	-1,2917	
FG9.7	70.348	0,070348	0,69	4,85	1,4985	23,4003	-1,4985	
FG9.8	1.579	0,001579	0,67	3,20	1,0463	10,1226	-1,0463	
FG9.9	292.855	0,292855	0,64	5,47	1,9625	29,7554	-1,9625	
FG9.10	1.818.254	1,818254	0,55	6,26	2,7985	38,9834	-2,7985	
FG10.2	2.404.230	2,404230	0,65	6,38	2,2280	40,5949	-2,2280	
FG10.3	6.400.000	6,400000	0,64	6,81	2,4563	46,1938	-2,4563	
FG10.5	2.432.106	2,432106	0,72	6,39	1,7888	40,7023	-1,7888	
FG11.2	217.296	0,217296	0,67	5,34	1,7350	28,3784	-1,7350	
FG11.3	41.102	0,041102						
FG11.4	70.943	0,070943	0,59	4,85	2,0060	23,3603	-2,0060	
punto fijo	1	0,000001	1,00	0,00	0,0000	0,0000	0,0000	
suma =					65,2780	1081,0694	-65,2780	
					a = 0,06016425			

Tabla A2.27. Calculo de la pendiente de la ley de fatiga obtenida de las Rf estimadas según relación doble inversa (formula [3]) de las Rc medidas en los semiprismas ensayados

Probeta nº	número de ciclos	N millones de ciclos	y = $\sigma/R_f$	x = logN	Coeficientes ecuación		
					a2	a	coefic. Independ.
AP7.1	3.250.000	3,250000					
AP7.2	1.340.000	1,340000					
FG1.1	74	0,000074					
FG1.2	0						
FG1.3	104.534	0,104534	0,97	5,02	0,1495	25,1921	-0,1495
FG1.4	13.473	0,013473	0,90	4,13	0,3960	17,0433	-0,3960
FG1.5	511.365	0,511365	0,58	5,71	2,4211	32,4097	-2,4211
FG1.6	7.042	0,007042	0,70	3,85	1,1506	14,7153	-1,1506
FG2.1	5.080.000	5,080000	0,68	6,71	2,1181	44,8688	-2,1181
FG2.2	1.097.880	1,097880	0,68	6,04	1,9072	36,3886	-1,9072
FG2.3	18.648.940	18,648940	0,53	7,27	3,4442	52,6380	-3,4442
FG2.4	298.501	0,298501	0,53	5,47	2,5981	29,7498	-2,5981
FG2.5	2.515.244	2,515244	0,77	6,40	1,4591	40,9155	-1,4591
FG2.6	3.217	0,003217	0,79	3,51	0,7433	12,2573	-0,7433
FG3.1	5.285.353	5,285353	0,40	6,72	4,0366	44,8392	-4,0366
FG3.2	11.487.356	11,487356	0,42	7,06	4,1207	49,5061	-4,1207
FG3.3	23.157	0,023157	0,69	4,36	1,3632	18,9529	-1,3632
FG3.4	11.476.510	11,476510	0,58	7,06	2,9390	49,6676	-2,9390
FG3.5	21.799.325	21,799325	0,86	7,34	1,0559	53,8320	-1,0559
FG3.6	1.357	0,001357	0,83	3,13	0,5396	9,7834	-0,5396
FG4.3	0		0,88				
FG4.5	10.108	0,010108	0,87	4,00	0,5297	16,0198	-0,5297
FG4.6	2.011	0,002011	0,72	3,30	0,9338	10,8326	-0,9338
FG5.2	868	0,000868	0,64	2,94	1,0724	8,5017	-1,0724
FG6.2	12.884	0,012884					
FG6.4	34.589	0,034589	0,95	4,54	0,2074	20,5999	-0,2074
FG6.6	1.561	0,001561					
FG6.7	2.913	0,002913	0,51	3,46	1,7134	11,7570	-1,7134
FG6.9	426.140	0,426140	0,63	5,63	2,0962	31,5532	-2,0962
FG6.13	59.306	0,059306	0,92	4,77	0,4016	22,7754	-0,4016
FG6.14	2.103.978	2,103978					
FG6.15	42	0,000042					
FG6.16	74	0,000074					
FG7.1	48	0,000048					
FG7.3	123	0,000123	0,78	2,09	0,4666	4,3178	-0,4666
FG7.4	1.245	0,001245	0,71	3,10	0,8929	9,4968	-0,8929
FG8.1	15.179	0,015179	0,76	4,18	1,0116	17,4243	-1,0116
FG8.3	1.126	0,001126	0,78	3,05	0,6613	9,2649	-0,6613
FG8.4	254.205	0,254205	0,58	5,41	2,2477	29,0431	-2,2477
FG8.5	1.052	0,001052	0,85	3,02	0,4428	9,1111	-0,4428
FG8.6	2.849	0,002849	0,76	3,45	0,8175	11,8789	-0,8175
FG9.2	21.555	0,021555	0,72	4,33	1,2151	18,7010	-1,2151
FG9.3	129	0,000129	0,78	2,11	0,4586	4,4074	-0,4586
FG9.5	64	0,000064	0,82	1,81	0,3178	3,2313	-0,3178
FG9.6	7.567	0,007567	0,66	3,88	1,3240	14,9295	-1,3240
FG9.7	70.348	0,070348	0,69	4,85	1,5131	23,3984	-1,5131
FG9.8	1.579	0,001579	0,66	3,20	1,0722	10,1173	-1,0722
FG9.9	292.855	0,292855	0,63	5,47	2,0008	29,7503	-2,0008
FG9.10	1.818.254	1,818254	0,55	6,26	2,8380	38,9777	-2,8380
FG10.2	2.404.230	2,404230	0,66	6,38	2,1434	40,6040	-2,1434
FG10.3	6.400.000	6,400000	0,66	6,81	2,3440	46,2055	-2,3440
FG10.5	2.432.106	2,432106	0,72	6,39	1,7629	40,7046	-1,7629
FG11.2	217.296	0,217296	0,68	5,34	1,6854	28,3844	-1,6854
FG11.3	41.102	0,041102					
FG11.4	70.943	0,070943	0,58	4,85	2,0255	23,3570	-2,0255
punto fijo	1	0,000001	1,00	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
suma =					64,6382	1068,1048	-64,6382
					a = 0,06029670		

Tabla A2.28. Calculo de la pendiente de la ley de fatiga obtenida de las Rf estimadas según relación doble inversa corregida (formula [4]) de las Rc medidas en los semiprismas ensayados

Probeta nº	número de ciclos	N millones de ciclos	y = $\sigma/R_f$	x = logN	Coeficientes ecuación			
					a2	a	coefic. Independ.	
AP7.1	3.250.000	3,250000						
AP7.2	1.340.000	1,340000						
FG1.1	74	0,000074						
FG1.2	0							
FG1.3	104.534	0,104534	0,95	4,13	0,2129	17,0498	-0,2129	
FG1.4	13.473	0,013473	0,60	5,71	2,2655	32,4321	-2,2655	
FG1.5	511.365	0,511365	0,74	3,85	1,0047	14,7366	-1,0047	
FG1.6	7.042	0,007042	0,72	6,71	1,8546	44,8921	-1,8546	
FG2.1	5.080.000	5,080000	0,72	6,04	1,6698	36,4119	-1,6698	
FG2.2	1.097.880	1,097880	0,56	7,27	3,2244	52,6657	-3,2244	
FG2.3	18.648.940	18,648940	0,56	5,47	2,4323	29,7777	-2,4323	
FG2.4	298.501	0,298501	0,82	6,40	1,1229	40,9366	-1,1229	
FG2.5	2.515.244	2,515244	0,84	3,51	0,5624	12,2765	-0,5624	
FG2.6	3.217	0,003217	0,44	6,72	3,7827	44,8832	-3,7827	
FG3.1	5.285.353	5,285353	0,45	7,06	3,8611	49,5476	-3,8611	
FG3.2	11.487.356	11,487356	0,73	4,36	1,1926	18,9758	-1,1926	
FG3.3	23.157	0,023157	0,63	7,06	2,6194	49,7033	-2,6194	
FG3.4	11.476.510	11,476510	0,90	7,34	0,7071	53,8435	-0,7071	
FG3.5	21.799.325	21,799325	0,88	3,13	0,3835	9,7981	-0,3835	
FG3.6	1.357	0,001357	0,93					
FG4.3	0		0,91	4,00	0,3421	16,0300	-0,3421	
FG4.5	10.108	0,010108	0,75	3,30	0,8104	10,8523	-0,8104	
FG4.6	2.011	0,002011	0,65	2,94	1,0308	8,5119	-1,0308	
FG5.2	868	0,000868						
FG6.2	12.884	0,012884	0,97	4,54	0,1168	20,6013	-0,1168	
FG6.4	34.589	0,034589						
FG6.6	1.561	0,001561	0,51	3,46	1,7093	11,7582	-1,7093	
FG6.7	2.913	0,002913	0,66	5,63	1,8882	31,5794	-1,8882	
FG6.9	426.140	0,426140	0,96	4,77	0,1909	22,7809	-0,1909	
FG6.13	59.306	0,059306						
FG6.14	2.103.978	2,103978						
FG6.15	42	0,000042						
FG6.16	74	0,000074						
FG7.1	48	0,000048	0,83	2,09	2,0899	3,3677	-2,0899	
FG7.3	123	0,000123	0,75	3,10	3,0952	8,5801	-3,0952	
FG7.4	1.245	0,001245	0,81	4,18	0,7157	17,4535	-0,7157	
FG8.1	15.179	0,015179	0,84	3,05	0,7485	9,2517	-0,7485	
FG8.3	1.126	0,001126	0,63	5,41	1,0174	29,1806	-1,0174	
FG8.4	254.205	0,254205	0,90	3,02	0,4983	9,1054	-0,4983	
FG8.5	1.052	0,001052	0,80	3,45	1,2612	11,8016	-1,2612	
FG8.6	2.849	0,002849	0,75	4,33	0,4312	18,7697	-0,4312	
FG9.2	21.555	0,021555	0,84	2,11	0,4136	4,4162	-0,4136	
FG9.3	129	0,000129	0,87	1,81	0,4593	3,1976	-0,4593	
FG9.5	64	0,000064	0,70	3,88	0,6396	15,0189	-0,6396	
FG9.6	7.567	0,007567	0,73	4,85	0,6136	23,4798	-0,6136	
FG9.7	70.348	0,070348	0,71	3,20	0,9440	10,1425	-0,9440	
FG9.8	1.579	0,001579	0,68	5,47	1,4929	29,8097	-1,4929	
FG9.9	292.855	0,292855	0,58	6,26	1,8083	39,0998	-1,8083	
FG9.10	1.818.254	1,818254	0,69	6,38	2,0644	40,6122	-2,0644	
FG10.2	2.404.230	2,404230	0,68	6,81	2,8325	46,1509	-2,8325	
FG10.3	6.400.000	6,400000	0,76	6,39	1,9840	40,6843	-1,9840	
FG10.5	2.432.106	2,432106	0,71	5,34	1,7130	28,3811	-1,7130	
FG11.2	217.296	0,217296						
FG11.3	41.102	0,041102	0,62	4,85	1,3923	23,4489	-1,3923	
FG11.4	70.943	0,070943	0,95	4,13	0,2129	17,0498	-0,2129	
punto fijo	1	0,000001	1,00	0,00	0,0000	0,0000	0,0000	
suma =					59,1996	1040,9966	-59,1996	
					a = 0,05668549			

Tabla A2.29. Calculo de la pendiente de la ley de fatiga obtenida de las Rf estimadas según relación lineal (formula [5]) de las Rti medidas en los semiprismas ensayados

Probeta n°	número de ciclos	N millones de ciclos	y = σ/Rf	x = logN	Coeficientes ecuación		
					a2	a	coefic. Independ.
AP7.1	3.250.000	3,250000					
AP7.2	1.340.000	1,340000					
FG1.1							
FG1.2							
FG1.3	104.534	0,104534	0,86	5,02	0,6872	25,1742	-0,6872
FG1.4	13.473	0,013473	0,83	4,13	0,6849	17,0250	-0,6849
FG1.5	511.365	0,511365	0,67	5,71	1,9093	32,4777	-1,9093
FG1.6	7.042	0,007042	0,79	3,85	0,8112	14,7603	-0,8112
FG2.1	5.080.000	5,080000	0,60	6,71	2,6939	44,8072	-2,6939
FG2.2	1.097.880	1,097880	0,66	6,04	2,0540	36,3727	-2,0540
FG2.3	18.648.940	18,648940	0,60	7,27	2,9371	52,6992	-2,9371
FG2.4	298.501	0,298501	0,51	5,47	2,6628	29,7385	-2,6628
FG2.5	2.515.244	2,515244	0,90	6,40	0,6368	40,9575	-0,6368
FG2.6	3.217	0,003217	0,59	3,51	1,4549	12,1302	-1,4549
FG3.1	5.285.353	5,285353	0,49	6,72	3,3971	44,9444	-3,3971
FG3.2	11.487.356	11,487356	0,55	7,06	3,1555	49,6470	-3,1555
FG3.3	23.157	0,023157	0,74	4,36	1,1421	18,9820	-1,1421
FG3.4	11.476.510	11,476510	0,86	7,06	1,0062	49,8206	-1,0062
FG3.5	21.799.325	21,799325	0,80	7,34	1,4858	53,8118	-1,4858
FG3.6	1.357	0,001357					
FG4.3	0						
FG4.5	10.108	0,010108	0,85	4,00	0,6103	16,0141	-0,6103
FG4.6	2.011	0,002011					
FG5.2	868	0,000868	0,66	2,94	1,0092	8,5170	-1,0092
FG6.2	12.884	0,012884	0,83	4,11			
FG6.4	34.589	0,034589	0,88	4,54	0,5659	20,5864	-0,5659
FG6.6	1.561	0,001561	0,75	3,19	0,8085	10,1337	-0,8085
FG6.7	2.913	0,002913	0,79	3,46	0,7443	11,9555	-0,7443
FG6.9	426.140	0,426140	0,68	5,63	1,8120	31,5883	-1,8120
FG6.11							
FG6.13	59.306	0,059306	0,93	4,77	0,3441	22,7773	-0,3441
FG6.14	2.103.978	2,103978	0,98	6,32	0,1297	39,9804	-0,1297
FG6.15	42	0,000042					
FG6.16	74	0,000074					
FG7.1	48	0,000048	0,86	1,68	0,2381	2,8065	-0,2381
FG7.3	123	0,000123					
FG7.4	1.245	0,001245	0,96	3,10	0,1271	9,5784	-0,1271
FG8.1	15.179	0,015179					
FG8.3	1.126	0,001126	0,78	3,05	0,6651	9,2644	-0,6651
FG8.4	254.205	0,254205	0,73	5,41	1,4567	29,1434	-1,4567
FG8.5	1.052	0,001052	0,96	3,02	0,1136	9,1312	-0,1136
FG8.6	2.849	0,002849	0,82	3,45	0,6325	11,9014	-0,6325
FG9.2	21.555	0,021555	0,63	4,33	1,5921	18,6447	-1,5921
FG9.3	129	0,000129					
FG9.5	64	0,000064					
FG9.6	7.567	0,007567					
FG9.7	70.348	0,070348	0,66	4,85	1,6260	23,3833	-1,6260
FG9.8	1.579	0,001579					
FG9.9	292.855	0,292855	0,72	5,47	1,5159	29,8074	-1,5159
FG9.10	1.818.254	1,818254	0,59	6,26	2,5884	39,0123	-2,5884
FG10.2	2.404.230	2,404230	0,57	6,38	2,7594	40,5299	-2,7594
FG10.3	6.400.000	6,400000	0,69	6,81	2,0772	46,2309	-2,0772
FG10.5	2.432.106	2,432106	0,79	6,39	1,3442	40,7365	-1,3442
FG11.2	217.296	0,217296	0,72	5,34	1,4741	28,4078	-1,4741
FG11.3	41.102	0,041102	0,73	4,61	1,2269	21,2170	-1,2269
FG11.4	70.943	0,070943	0,80	4,85	0,9532	23,4927	-0,9532
punto fijo	1	0,000001	1,00	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
suma =					53,1335	1068,1886	-53,1335
					a = 0,04961921		

Tabla A2.30. Calculo de la pendiente de la ley de fatiga obtenida de las Rf estimadas según relación lineal corregida (formula [5]) de las Rti medidas en los semiprismas ensayados

Probeta nº	número de ciclos	N millones de ciclos	y = σ/Rf	x = logN	Coeficientes ecuación			
					a2	a	coefic. Independ.	
AP7.1	3.250.000	3,250000						
AP7.2	1.340.000	1,340000						
FG1.1								
FG1.2								
FG1.3	104.534	0,104534	0,86	5,02	0,6872	25,1742	-0,6872	
FG1.4	13.473	0,013473	0,83	4,13	0,6849	17,0250	-0,6849	
FG1.5	511.365	0,511365	0,67	5,71	1,9093	32,4777	-1,9093	
FG1.6	7.042	0,007042	0,79	3,85	0,8112	14,7603	-0,8112	
FG2.1	5.080.000	5,080000	0,60	6,71	2,6939	44,8072	-2,6939	
FG2.2	1.097.880	1,097880	0,66	6,04	2,0540	36,3727	-2,0540	
FG2.3	18.648.940	18,648940	0,60	7,27	2,9371	52,6992	-2,9371	
FG2.4	298.501	0,298501	0,51	5,47	2,6628	29,7385	-2,6628	
FG2.5	2.515.244	2,515244	0,90	6,40	0,6368	40,9575	-0,6368	
FG2.6	3.217	0,003217	0,59	3,51	1,4549	12,1302	-1,4549	
FG3.1	5.285.353	5,285353	0,49	6,72	3,3971	44,9444	-3,3971	
FG3.2	11.487.356	11,487356	0,55	7,06	3,1555	49,6470	-3,1555	
FG3.3	23.157	0,023157	0,74	4,36	1,1421	18,9820	-1,1421	
FG3.4	11.476.510	11,476510	0,86	7,06	1,0062	49,8206	-1,0062	
FG3.5	21.799.325	21,799325	0,80	7,34	1,4858	53,8118	-1,4858	
FG3.6	1.357	0,001357						
FG4.3	0							
FG4.5	10.108	0,010108	0,85	4,00	0,6103	16,0141	-0,6103	
FG4.6	2.011	0,002011						
FG5.2	868	0,000868	0,66	2,94	1,0092	8,5170	-1,0092	
FG6.2	12.884	0,012884	0,83	4,11				
FG6.4	34.589	0,034589	0,88	4,54	0,5659	20,5864	-0,5659	
FG6.6	1.561	0,001561	0,75	3,19	0,8085	10,1337	-0,8085	
FG6.7	2.913	0,002913						
FG6.9	426.140	0,426140	0,68	5,63	1,8120	31,5883	-1,8120	
FG6.11								
FG6.13	59.306	0,059306	0,93	4,77	0,3441	22,7773	-0,3441	
FG6.14	2.103.978	2,103978	0,98	6,32	0,1297	39,9804	-0,1297	
FG6.15	42	0,000042						
FG6.16	74	0,000074						
FG7.1	48	0,000048	0,86	1,68	0,2381	2,8065	-0,2381	
FG7.3	123	0,000123						
FG7.4	1.245	0,001245	0,96	3,10	0,1271	9,5784	-0,1271	
FG8.1	15.179	0,015179						
FG8.3	1.126	0,001126	0,78	3,05	0,6651	9,2644	-0,6651	
FG8.4	254.205	0,254205	0,73	5,41	1,4567	29,1434	-1,4567	
FG8.5	1.052	0,001052	0,96	3,02	0,1136	9,1312	-0,1136	
FG8.6	2.849	0,002849	0,82	3,45	0,6325	11,9014	-0,6325	
FG9.2	21.555	0,021555	0,63	4,33	1,5921	18,6447	-1,5921	
FG9.3	129	0,000129						
FG9.5	64	0,000064						
FG9.6	7.567	0,007567						
FG9.7	70.348	0,070348	0,66	4,85	1,6260	23,3833	-1,6260	
FG9.8	1.579	0,001579						
FG9.9	292.855	0,292855	0,72	5,47	1,5159	29,8074	-1,5159	
FG9.10	1.818.254	1,818254	0,59	6,26	2,5884	39,0123	-2,5884	
FG10.2	2.404.230	2,404230	0,57	6,38	2,7594	40,5299	-2,7594	
FG10.3	6.400.000	6,400000	0,69	6,81	2,0772	46,2309	-2,0772	
FG10.5	2.432.106	2,432106	0,79	6,39	1,3442	40,7365	-1,3442	
FG11.2	217.296	0,217296	0,72	5,34	1,4741	28,4078	-1,4741	
FG11.3	41.102	0,041102	0,73	4,61	1,2269	21,2170	-1,2269	
FG11.4	70.943	0,070943	0,80	4,85	0,9532	23,4927	-0,9532	
punto fijo	1	0,000001	1,00	0,00	0,0000	0,0000	0,0000	
suma =					52,3891	1056,2331	-52,3891	
					a = 0,04947855			

---

## ANEJO 3



## CALCULOS ESTRUCTURALES DE LAS SECCIONES DE FIRME



## Ficha A3.1. Datos y resultados del cálculo estructural. Categoría de tráfico T00

## CÁLCULO ANALÍTICO DE FIRMES RECICLADOS

SECCIÓN	T00
---------	-----

IMDp carril	% CREC.	F factor crecimiento	Coef. Equiv.	Coef. Mayoración cargas	TEP
7.000	3,00	26,87	0,60	1,20	49.430.741
Eje simple tipo	Radio de carga cm	Presión de contacto kg/cm <sup>2</sup>	Distancia entre ejes de llantas cm	Duración de la vida del firme años	
13 t + ruedas gemelas	12,50	6,62	37,50	20,00	

CAPA	MÓDULO ELASTICO kg/cm <sup>2</sup>	COEF. POISSON	ESPESOR	ADHERENCIA /NO ADHERENCIA
M.B.Discontinua	40.000	0,35	3	A
M.B.C	60.000	0,33	8	A
M.B.C	60.000	0,33	9	A
RC	50.000	0,25	35	A
E3	2.000	0,35		

Deflexión (mm/100)	12,09	Radio de Curvatura (m)	1.574,28	Deformac. inicial < 80 mm/100	<b>VERDADERO</b>
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-20,10	1,37	82,80	-11,00		
<b>Mezcla Bituminosa - Base</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-16,60	-0,20	45,20	-20,00		
<b>Reciclado</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)	$R_F (kg/cm^2)$	
-29,80	-2,09	31,10	-55,00	-6,93	
<b>Explanada</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-29,80	0,00	80,60	-55,00		

<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-55,51	<b>VERDADERO</b>	<b>2.057.335.612</b>	<b>119,84</b>
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-55,51	<b>VERDADERO</b>	<b>4.152.345.371</b>	<b>143,10</b>
<b>Reciclado con cemento</b>				
Ley de fatiga	$\sigma_r (kg/cm^2)$	Validez	TEP	Años
$\sigma_r = 6,93 \cdot (1-0,058 \cdot \log N)$	-3,84	<b>VERDADERO</b>	<b>1.119.597.832.616</b>	<b>331,96</b>
<b>Explanada</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_z (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$	307,53	<b>VERDADERO</b>	<b>469.734.581</b>	<b>73,03</b>

Ficha A3.2. Datos y resultados del cálculo estructural. Categoría de tráfico T0

CÁLCULO ANALÍTICO DE FIRMES RECICLADOS

SECCIÓN	T0
---------	----

IMDp carril	% CREC.	F factor crecimiento	Coef. Equiv.	Coef. Mayoración cargas	TEP
4.000	3,00	26,87	0,60	1,20	28.246.138
Eje simple tipo	Radio de carga cm	Presión de contacto kg/cm <sup>2</sup>	Distancia entre ejes de llantas cm	Duración de la vida del firme años	
13 t + ruedas gemelas	12,50	6,62	37,50	20,00	

CAPA	MÓDULO ELÁSTICO kg/cm <sup>2</sup>	COEF. POISSON	ESPESOR	ADHERENCIA /NO ADHERENCIA
M.B.Discontinua	40.000	0,35	3	A
M.B.C	60.000	0,33	6	A
M.B.C	60.000	0,33	9	A
RC	50.000	0,25	35	A
E3	2.000	0,35		

Deflexión (mm/100)	12,49	Radio de Curvatura (m)	1.532,19	Deformac. inicial < 80 mm/100	VERDADERO
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-19,10	2,00	-7,10	-9,00		
<b>Mezcla Bituminosa - Base</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-18,40	-0,15	52,20	-18,00		
<b>Reciclado</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)	$R_F (kg/cm^2)$	
-31,80	-2,22	33,00	-53,00	-6,93	
<b>Explanada</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-31,80	0,00	85,90	-53,00		

<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-64,65	VERDADERO	2.481.172.818	144,59
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-64,65	VERDADERO	2.845.633.003	149,17
<b>Reciclado con cemento</b>				
Ley de fatiga	$\sigma_r (kg/cm^2)$	Validez	TEP	Años
$\sigma_r = 6,93 \cdot (1-0,058 \cdot \log N)$	-3,94	VERDADERO	510.757.975.045	324,34
<b>Explanada</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_z (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$	351,74	VERDADERO	374.173.931	83,15

## Ficha A3.3. Datos y resultados del cálculo estructural. Categoría de tráfico T1 opción a

## CÁLCULO ANALÍTICO DE FIRMES RECICLADOS

SECCIÓN	T1a
---------	-----

IMDp carril	% CREC.	F factor crecimiento	Coef. Equiv.	Coef. Mayoración cargas	TEP
2.000	3,00	26,87	0,60	1,20	14.123.069
Eje simple tipo	Radio de carga cm	Presión de contacto kg/cm <sup>2</sup>	Distancia entre ejes de llantas cm	Duración de la vida del firme años	
13 t + ruedas gemelas	12,50	6,62	37,50	20,00	

CAPA	MÓDULO ELÁSTICO kg/cm <sup>2</sup>	COEF. POISSON	ESPESOR	ADHERENCIA /NO ADHERENCIA
M.B.Discontinua	40.000	0,35	3	A
M.B.C	60.000	0,33	5	A
M.B.C	60.000	0,33	8	A
RC	50.000	0,25	35	A
E3	2.000	0,35		

Deflexión (mm/100)	12,90	Radio de Curvatura (m)	1.485,13	Deformac. inicial < 80 mm/100	VERDADERO
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-17,40	2,43	-11,40	-8,00		
<b>Mezcla Bituminosa - Base</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-20,50	-0,07	60,40	-16,00		
<b>Reciclado</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)	$R_F (kg/cm^2)$	
-34,10	-2,37	60,40	-51,00	-6,93	
<b>Explanada</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-34,10	0,00	91,80	-51,00		

<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años teóricos
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-78,08	VERDADERO	3.493.500.118	179,31
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-78,08	VERDADERO	1.913.781.228	159,09
<b>Reciclado con cemento</b>				
Ley de fatiga	$\sigma_r (kg/cm^2)$	Validez	TEP	Años
$\sigma_r = 6,93 \cdot (1-0,058 \cdot \log N)$	-4,06	VERDADERO	217.526.945.549	318,92
<b>Explanada</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_z (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$	415,40	VERDADERO	295.147.790	97,49

Ficha A3.4. Datos y resultados del cálculo estructural. Categoría de tráfico T1 opción b

CÁLCULO ANALÍTICO DE FIRMES RECICLADOS

SECCIÓN	T1b
---------	-----

IMDp carril	% CREC.	F factor crecimiento	Coef. Equiv.	Coef. Mayoración cargas	TEP
2.000	3,00	26,87	0,60	1,20	14.123.069
Eje simple tipo	Radio de carga cm	Presión de contacto kg/cm <sup>2</sup>	Distancia entre ejes de llantas cm	Duración de la vida del firme años	
13 t + ruedas gemelas	12,50	6,62	37,50	20,00	

CAPA	MÓDULO ELASTICO kg/cm <sup>2</sup>	COEF. POISSON	ESPESOR	ADHERENCIA /NO ADHERENCIA
M.B.Discontinua	40.000	0,35	3	A
M.B.C	60.000	0,33	6	A
M.B.C	60.000	0,33	9	A
RC	50.000	0,25	30	A
E3	2.000	0,35		

Deflexión (mm/100)	13,53	Radio de Curvatura (m)	1.461,45	Deformac. inicial < 80 mm/100	VERDADERO
Mezcla Bituminosa - Intermedia					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-18,30	2,11	-8,70	-9,00		
Mezcla Bituminosa - Base					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-18,40	-0,18	51,70	-18,00		
Reciclado				$R_F (kg/cm^2)$	
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-37,70	-2,61	38,40	-48,00	-6,93	
Explanada					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-37,70	0,01	100,90	-48,00		

Mezcla Bituminosa - Rodadura				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años teóricos
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-78,08	VERDADERO	2.903.129.310	173,09
Mezcla Bituminosa - Intermedia				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-78,08	VERDADERO	2.845.633.003	172,41
Reciclado con cemento				
Ley de fatiga	$\sigma_r (kg/cm^2)$	Validez	TEP	Años
$\sigma_r = 6,93 \cdot (1-0,058 \cdot \log N)$	-4,06	VERDADERO	56.929.401.410	273,57
Explanada				
Ley de fatiga	$\epsilon_z (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$	415,40	VERDADERO	210.590.028	86,83

## Ficha A3.5. Datos y resultados del cálculo estructural. Categoría de tráfico T21 opción a

## CÁLCULO ANALÍTICO DE FIRMES RECICLADOS

SECCIÓN	T21a
---------	------

IMDp carril	% CREC.	F factor crecimiento	Coef. Equiv.	Coef. Mayoración cargas	TEP
800	3,00	26,87	0,60	1,10	5.178.459
Eje simple tipo	Radio de carga cm	Presión de contacto kg/cm <sup>2</sup>	Distancia entre ejes de llantas cm	Duración de la vida del firme años	
13 t + ruedas gemelas	12,50	6,62	37,50	20,00	

CAPA	MÓDULO ELÁSTICO kg/cm <sup>2</sup>	COEF. POISSON	ESPESOR	ADHERENCIA /NO ADHERENCIA
M.B.C	60.000	0,33	6	A
M.B.C	60.000	0,33	6	A
RC	50.000	0,25	35	A
E3	2.000	0,35		

Deflexión (mm/100)	13,67	Radio de Curvatura (m)	1.402,01	Deformac. inicial < 80 mm/100	VERDADERO
<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-10,80	3,54	-19,80	-6,00		
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-21,00	0,95	76,10	-12,00		
<b>Reciclado</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)	$R_F (kg/cm^2)$	
-39,20	-2,42	26,50	-47,00	-6,93	
<b>Explanada</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-39,20	0,00	104,20	-47,00		

Mezcla Bituminosa - Rodadura				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años teóricos
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-102,63	VERDADERO	20.116.370.108	272,32
Mezcla Bituminosa - Intermedia				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-102,63	VERDADERO	1.751.770.309	189,86
Reciclado con cemento				
Ley de fatiga	$\sigma_r (kg/cm^2)$	Validez	TEP	Años
$\sigma_r = 6,93 \cdot (1-0,058 \cdot \log N)$	-4,23	VERDADERO	171.009.348.998	344,72
Explanada				
Ley de fatiga	$\epsilon_z (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{0,28}$	528,50	VERDADERO	187.724.754	115,32

Ficha A3.6. Datos y resultados del cálculo estructural. Categoría de tráfico T21 opción b

CÁLCULO ANALÍTICO DE FIRMES RECICLADOS

SECCIÓN	T21b
---------	------

IMDp carril	% CREC.	F factor crecimiento	Coef. Equiv.	Coef. Mayoración cargas	TEP
800	3,00	26,87	0,60	1,10	5.178.459
Eje simple tipo	Radio de carga cm	Presión de contacto kg/cm <sup>2</sup>	Distancia entre ejes de llantas cm	Duración de la vida del firme años	
13 t + ruedas gemelas	12,50	6,62	37,50	20,00	

CAPA	MÓDULO ELASTICO kg/cm <sup>2</sup>	COEF. POISSON	ESPESOR	ADHERENCIA /NO ADHERENCIA
M.B.C	60.000	0,33	6	A
M.B.C	60.000	0,33	8	A
RC	50.000	0,25	30	A
E3	2.000	0,35		

Deflexión (mm/100)	14,36	Radio de Curvatura (m)	1.373,91	Deformac. inicial < 80 mm/100	<b>VERDADERO</b>
<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
10,10	3,64	-21,00	-6,00		
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-19,70	0,64	65,70	-14,00		
<b>Reciclado</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)	$R_F (kg/cm^2)$	
-43,70	-2,68	29,20	-44,00	-6,93	
<b>Explanada</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-43,70	0,00	115,30	-44,00		

<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años teóricos
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-102,63	<b>VERDADERO</b>	<b>25.726.149.536</b>	<b>280,64</b>
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-102,63	<b>VERDADERO</b>	<b>2.214.876.184</b>	<b>197,77</b>
<b>Reciclado con cemento</b>				
Ley de fatiga	$\sigma_r (kg/cm^2)$	Validez	TEP	Años
$\sigma_r = 6,93 \cdot (1-0,058 \cdot \log N)$	-4,23	<b>VERDADERO</b>	<b>38.122.491.024</b>	<b>293,95</b>
<b>Explanada</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_z (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$	528,50	<b>VERDADERO</b>	<b>130.772.333</b>	<b>103,57</b>

## Ficha A3.7. Datos y resultados del cálculo estructural. Categoría de tráfico T22

## CÁLCULO ANALÍTICO DE FIRMES RECICLADOS

SECCIÓN	T22
---------	-----

IMDp carril	% CREC.	F factor crecimiento	Coef. Equiv.	Coef. Mayoración cargas	TEP
400	3,00	26,87	0,60	1,10	2.589.229
Eje simple tipo	Radio de carga cm	Presión de contacto kg/cm <sup>2</sup>	Distancia entre ejes de llantas cm	Duración de la vida del firme años	
13 t + ruedas gemelas	12,50	6,62	37,50	20,00	

CAPA	MÓDULO ELÁSTICO kg/cm <sup>2</sup>	COEF. POISSON	ESPESOR	ADHERENCIA /NO ADHERENCIA
M.B.C	60.000	0,33	6	A
M.B.C	60.000	0,33	6	A
RC	50.000	0,25	30	A
E3	2.000	0,35		

Deflexión (mm/100)	14,96	Radio de Curvatura (m)	1.313,97	Deformac. inicial < 80 mm/100	VERDADERO
<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-9,40	3,72	-22,10	-6,00		
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-20,70	0,96	75,30	-12,00		
<b>Reciclado</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)	$R_F (kg/cm^2)$	
-47,20	-2,88	31,20	-42,00	-6,93	
<b>Explanada</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-47,20	0,00	124,10	-42,00		

<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años teóricos
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-123,96	VERDADERO	33.486.968.722	313,01
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-123,96	VERDADERO	1.846.779.212	215,03
<b>Reciclado con cemento</b>				
Ley de fatiga	$\sigma_r (kg/cm^2)$	Validez	TEP	Años
$\sigma_r = 6,93 \cdot (1-0,058 \cdot \log N)$	-4,35	VERDADERO	11.984.466.322	278,25
<b>Explanada</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_z (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$	624,16	VERDADERO	100.562.395	117,57

Ficha A3.8. Datos y resultados del cálculo estructural. Categoría de tráfico T31 opción a

CÁLCULO ANALÍTICO DE FIRMES RECICLADOS

SECCIÓN	T31a
---------	------

IMDp carril	% CREC.	F factor crecimiento	Coef. Equiv.	Coef. Mayoración cargas	TEP
200	3,00	26,87	0,60	1,10	1.294.615
Eje simple tipo	Radio de carga cm	Presión de contacto kg/cm <sup>2</sup>	Distancia entre ejes de llantas cm	Duración de la vida del firme años	
13 t + ruedas gemelas	12,50	6,62	37,50	20,00	

CAPA	MÓDULO ELASTICO kg/cm <sup>2</sup>	COEF. POISSON	ESPESOR	ADHERENCIA /NO ADHERENCIA
M.B.C	60.000	0,33	5	A
M.B.C	60.000	0,33	5	A
RC	50.000	0,25	30	A
E3	2.000	0,35		

Deflexión (mm/100)	15,61	Radio de Curvatura (m)	1.248,41	Deformac. inicial < 80 mm/100	<b>VERDADERO</b>
Mezcla Bituminosa - Rodadura					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
2,70	4,60	-26,90	-5,00		
Mezcla Bituminosa - Intermedia					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-20,30	1,53	-6,60	-10,00		
Reciclado					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)	$R_F (kg/cm^2)$	
-51,10	-3,10	33,50	-40,00	-6,93	
Explanada					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-51,10	0,01	133,90	-40,00		

Mezcla Bituminosa - Rodadura				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años teóricos
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-149,72	<b>VERDADERO</b>	<b>3.262.208.970.511</b>	<b>491,37</b>
Mezcla Bituminosa - Intermedia				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-149,72	<b>VERDADERO</b>	<b>1.983.907.158</b>	<b>240,87</b>
Reciclado con cemento				
Ley de fatiga	$\sigma_r (kg/cm^2)$	Validez	TEP	Años
$\sigma_r = 6,93 \cdot (1-0,058 \cdot \log N)$	-4,47	<b>VERDADERO</b>	<b>3.302.430.273</b>	<b>258,10</b>
Explanada				
Ley de fatiga	$\epsilon_z (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$	737,12	<b>VERDADERO</b>	<b>76.656.158</b>	<b>131,48</b>

## Ficha A3.9. Datos y resultados del cálculo estructural. Categoría de tráfico T31 opción b

## CÁLCULO ANALÍTICO DE FIRMES RECICLADOS

SECCIÓN	T31b
---------	------

IMDp carril	% CREC.	F factor crecimiento	Coef. Equiv.	Coef. Mayoración cargas	TEP
200	3,00	26,87	0,60	1,10	1.294.615
Eje simple tipo	Radio de carga cm	Presión de contacto kg/cm <sup>2</sup>	Distancia entre ejes de llantas cm	Duración de la vida del firme años	
13 t + ruedas gemelas	12,50	6,62	37,50	20,00	

CAPA	MÓDULO ELASTICO kg/cm <sup>2</sup>	COEF. POISSON	ESPESOR	ADHERENCIA /NO ADHERENCIA
M.B.C	60.000	0,33	6	A
M.B.C	60.000	0,33	6	A
RC	50.000	0,25	25	A
E3	2.000	0,35		

Deflexión (mm/100)	16,57	Radio de Curvatura (m)	1.196,19	Deformac. inicial < 80 mm/100	VERDADERO
<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
7,60	3,93	-24,80	-6,00		
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-20,60	0,90	74,30	-12,00		
<b>Reciclado</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)	$R_F (kg/cm^2)$	
-57,80	-3,48	37,20	-37,00	-6,93	
<b>Explanada</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-57,80	0,01	149,80	-37,00		

<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años teóricos
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-149,72	VERDADERO	73.068.604.534	362,85
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-149,72	VERDADERO	1.879.900.445	239,05
<b>Reciclado con cemento</b>				
Ley de fatiga	$\sigma_r (kg/cm^2)$	Validez	TEP	Años
$\sigma_r = 6,93 \cdot (1-0,058 \cdot \log N)$	-4,47	VERDADERO	378.786.756	184,97
<b>Explanada</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_z (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$	737,12	VERDADERO	51.346.036	118,26

**Ficha A3.10. Datos y resultados del cálculo estructural. Categoría de tráfico T32**

**CÁLCULO ANALÍTICO DE FIRMES RECICLADOS**

<b>SECCIÓN</b>	<b>T32</b>
----------------	------------

IMDp carril	% CREC.	F factor crecimiento	Coef. Equiv.	Coef. Mayoración cargas	TEP
100	3,00	26,87	0,60	1,10	647.307
Eje simple tipo	Radio de carga cm	Presión de contacto kg/cm <sup>2</sup>	Distancia entre ejes de llantas cm	Duración de la vida del firme años	
13 t + ruedas gemelas	12,50	6,62	37,50	20,00	

CAPA	MÓDULO ELASTICO kg/cm <sup>2</sup>	COEF. POISSON	ESPESOR	ADHERENCIA /NO ADHERENCIA
M.B.C	60.000	0,33	5	A
M.B.C	60.000	0,33	5	A
RC	50.000	0,25	25	A
E3	2.000	0,35		

Deflexión (mm/100)	17,38	Radio de Curvatura (m)	1.121,36	Deformac. inicial < 80 mm/100	<b>VERDADERO</b>
<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
0,40	4,88	-30,30	-5,00		
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-19,80	1,54	-7,70	-10,00		
<b>Reciclado</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)	$R_F (kg/cm^2)$	
-63,00	-3,77	40,00	-35,00	-6,93	
<b>Explanada</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-63,00	0,01	162,60	-35,00		

<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años teóricos
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-180,84	<b>VERDADERO</b>	<b>3.610.857.465.148.130</b>	<b>751,95</b>
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-180,84	<b>VERDADERO</b>	<b>2.174.091.344</b>	<b>267,40</b>
<b>Reciclado con cemento</b>				
Ley de fatiga	$\sigma_r (kg/cm^2)$	Validez	TEP	Años
$\sigma_r = 6,93 \cdot (1-0,058 \cdot \log N)$	-4,59	<b>VERDADERO</b>	<b>71.516.480</b>	<b>152,26</b>
<b>Explanada</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_z (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{0,28}$	870,54	<b>VERDADERO</b>	<b>38.311.830</b>	<b>131,46</b>

Ficha A3.11. Datos y resultados del cálculo estructural. Categoría de tráfico T41 opción a

CÁLCULO ANALÍTICO DE FIRMES RECICLADOS

SECCIÓN	T41a
---------	------

IMDp carril	% CREC.	F factor crecimiento	Coef. Equiv.	Coef. Mayoración cargas	TEP
50	3,00	26,87	0,60	1,00	294.231
Eje simple tipo	Radio de carga cm	Presión de contacto kg/cm <sup>2</sup>	Distancia entre ejes de llantas cm	Duración de la vida del firme años	
13 t + ruedas gemelas	12,50	6,62	37,50	20,00	

CAPA	MÓDULO ELASTICO kg/cm <sup>2</sup>	COEF. POISSON	ESPESOR	ADHERENCIA /NO ADHERENCIA
M.B.C	60.000	0,33	4	A
M.B.C	60.000	0,33	4	A
RC	50.000	0,25	25	A
E3	2.000	0,35		

Deflexión (mm/100)	18,28	Radio de Curvatura (m)	1.042,44	Deformac. inicial < 80 mm/100	VERDADERO
<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
34,70	6,06	-35,90	-4,00		
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-15,70	2,55	-18,40	-8,00		
<b>Reciclado</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)	$R_F (kg/cm^2)$	
-68,90	-4,10	43,00	-33,00	-6,93	
<b>Explanada</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-68,90	0,01	177,10	-33,00		

Mezcla Bituminosa - Rodadura				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años teóricos
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-224,17	VERDADERO	277.247.200	224,44
Mezcla Bituminosa - Intermedia				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-224,17	VERDADERO	5.095.122.046	322,88
Reciclado con cemento				
Ley de fatiga	$\sigma_r (kg/cm^2)$	Validez	TEP	Años
$\sigma_r = 6,93 \cdot (1-0,058 \cdot \log N)$	-4,73	VERDADERO	10.986.310	116,28
Explanada				
Ley de fatiga	$\epsilon_z (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$	1.051,89	VERDADERO	28.238.392	147,55

Ficha A3.12. Datos y resultados del cálculo estructural. Categoría de tráfico T41 opción b

CÁLCULO ANALÍTICO DE FIRMES RECICLADOS

SECCIÓN	T41b
---------	------

IMDp carril	% CREC.	F factor crecimiento	Coef. Equiv.	Coef. Mayoración cargas	TEP
50	3,00	26,87	0,60	1,00	294.231
Eje simple tipo	Radio de carga cm	Presión de contacto kg/cm <sup>2</sup>	Distancia entre ejes de llantas cm	Duración de la vida del firme años	
13 t + ruedas gemelas	12,50	6,62	37,50	20,00	

CAPA	MÓDULO ELASTICO kg/cm <sup>2</sup>	COEF. POISSON	ESPESOR	ADHERENCIA /NO ADHERENCIA
M.B.C	60.000	0,33	4	A
M.B.C	60.000	0,33	4	A
RC	50.000	0,25	22	A
E3	2.000	0,35		

Deflexión (mm/100)	19,73	Radio de Curvatura (m)	943,93	Deformac. inicial < 80 mm/100	<b>VERDADERO</b>
<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
38,50	6,32	-38,90	-4,00		
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-15,10	1,70	-19,30	-8,00		
<b>Reciclado</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)	$R_F (kg/cm^2)$	
-79,20	-4,66	49,50	-30,00	-6,93	
<b>Explanada</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-79,20	0,02	202,20	-30,00		

<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años teóricos
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-224,17	<b>VERDADERO</b>	<b>189.323.851</b>	<b>211,55</b>
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-224,17	<b>VERDADERO</b>	<b>5.878.577.098</b>	<b>327,72</b>
<b>Reciclado con cemento</b>				
Ley de fatiga	$\sigma_r (kg/cm^2)$	Validez	TEP	Años
$\sigma_r = 6,93 \cdot (1-0,058 \cdot \log N)$	-4,73	<b>VERDADERO</b>	<b>441.694</b>	<b>26,83</b>
<b>Explanada</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_z (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{0,28}$	1.051,89	<b>VERDADERO</b>	<b>17.589.735</b>	<b>131,80</b>

## Ficha A3.13. Datos y resultados del cálculo estructural. Categoría de tráfico T42 opción a

## CÁLCULO ANALÍTICO DE FIRMES RECICLADOS

SECCIÓN	T42a
---------	------

IMDp carril	% CREC.	F factor crecimiento	Coef. Equiv.	Coef. Mayoración cargas	TEP
25	3,00	26,87	0,60	1,00	147.115
Eje simple tipo	Radio de carga cm	Presión de contacto kg/cm <sup>2</sup>	Distancia entre ejes de llantas cm	Duración de la vida del firme años	
13 t + ruedas gemelas	12,50	6,62	37,50	20,00	

CAPA	MÓDULO ELASTICO kg/cm <sup>2</sup>	COEF. POISSON	ESPESOR	ADHERENCIA /NO ADHERENCIA
M.B.C	60.000	0,33	5	A
RC	50.000	0,25	25	A
E3	2.000	0,35		

Deflexión (mm/100)	19,88	Radio de Curvatura (m)	917,26	Deformac. inicial < 80 mm/100	<b>VERDADERO</b>
<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
32,20	5,21	-36,70	-5,00		
<b>Reciclado</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)	$R_f (kg/cm^2)$	
-79,60	-4,68	49,80	-30,00	-6,93	
<b>Explanada</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-79,60	0,02	203,90	-30,00		

<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años teóricos
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-270,77	<b>VERDADERO</b>	<b>364.810.202</b>	<b>257,14</b>
<b>Reciclado con cemento</b>				
Ley de fatiga	$\sigma_r (kg/cm^2)$	Validez	TEP	Años
$\sigma_r = 6,93 \cdot (1-0,058 \cdot \log N)$	-4,85	<b>VERDADERO</b>	<b>396.142</b>	<b>39,04</b>
<b>Explanada</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_z (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$	1.242,27	<b>VERDADERO</b>	<b>17.071.564</b>	<b>153,90</b>

Ficha A3.14. Datos y resultados del cálculo estructural. Categoría de tráfico T42 opción b

CÁLCULO ANALÍTICO DE FIRMES RECICLADOS

SECCIÓN	T42b
---------	------

IMDp carril	% CREC.	F factor crecimiento	Coef. Equiv.	Coef. Mayoración cargas	TEP
25	3,00	26,87	0,60	1,00	147.115
Eje simple tipo	Radio de carga cm	Presión de contacto kg/cm <sup>2</sup>	Distancia entre ejes de llantas cm	Duración de la vida del firme años	
13 t + ruedas gemelas	12,50	6,62	37,50	20,00	

CAPA	MÓDULO ELASTICO kg/cm <sup>2</sup>	COEF. POISSON	ESPESOR	ADHERENCIA /NO ADHERENCIA
M.B.C	60.000	0,33	5	A
RC	50.000	0,25	20	A
E3	2.000	0,35		

Deflexión (mm/100)	22,91	Radio de Curvatura (m)	736,08	Deformac. inicial < 80 mm/100	<b>VERDADERO</b>
<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
37,70	5,57	-40,90	-5,00		
<b>Reciclado</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)	$R_F (kg/cm^2)$	
-102,00	-6,00	65,10	-25,00	-6,93	
<b>Explanada</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-102,00	0,04	269,40	-25,00		

<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años teóricos
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-270,77	<b>VERDADERO</b>	<b>204.493.516</b>	<b>0,00</b>
<b>Reciclado con cemento</b>				
Ley de fatiga	$\sigma_r (kg/cm^2)$	Validez	TEP	Años
$\sigma_r = 6,93 \cdot (1-0,058 \cdot \log N)$	-4,85	<b>FALSO</b>	<b>211</b>	<b>0,04</b>
<b>Explanada</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_z (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$	1.242,27	<b>VERDADERO</b>	<b>6.312.488</b>	<b>120,85</b>

Ficha A3.15. Datos y resultados del cálculo estructural. Categoría T00 y fallo en explanada

CÁLCULO ANALÍTICO DE FIRMES RECICLADOS

SECCIÓN	T00
---------	-----

IMDp carril	% CREC.	F factor crecimiento	Coef. Equiv.	Coef. Mayoración cargas	TEP
7.000	3,00	26,87	0,60	1,20	49.430.741
Eje simple tipo	Radio de carga cm	Presión de contacto kg/cm <sup>2</sup>	Distancia entre ejes de llantas cm	Duración de la vida del firme años	
13 t + ruedas gemelas	12,50	6,62	37,50	20,00	

CAPA	MÓDULO ELASTICO kg/cm <sup>2</sup>	COEF. POISSON	ESPESOR	ADHERENCIA /NO ADHERENCIA
M.B.Discontinua	40.000	0,35	3	A
M.B.C	60.000	0,33	8	A
M.B.C	60.000	0,33	9	A
RC	50.000	0,25	35	A
E3 bajo	1.200	0,35		

Deflexión (mm/100)	16,81	Radio de Curvatura (m)	1.540,58	1466,96	VERDADERO
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-19,20	1,52	-1,30	-11,00		
<b>Mezcla Bituminosa - Base</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-16,00	-0,17	44,80	-20,00		
<b>Reciclado</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)	$R_F (kg/cm^2)$	
-33,50	-2,40	34,40	-55,00	-6,93	
<b>Explanada</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-33,50	0,01	95,30	-55,00		

<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-55,51	VERDADERO	2.434.066.554	125,38
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-55,51	VERDADERO	4.753.138.735	147,61
<b>Reciclado con cemento</b>				
Ley de fatiga	$\sigma_r (kg/cm^2)$	Validez	TEP	Años
$\sigma_r = 6,93 \cdot (1-0,058 \cdot \log N)$	-3,84	VERDADERO	190.673.610.679	272,09
<b>Explanada</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_z (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$	307,53	VERDADERO	258.227.825	55,85

**Ficha A3.16. Datos y resultados del cálculo estructural. Categoría T0 y fallo en explanada**

**CÁLCULO ANALÍTICO DE FIRMES RECICLADOS**

SECCIÓN	T0
---------	----

IMDp carril	% CREC.	F factor crecimiento	Coef. Equiv.	Coef. Mayoración cargas	TEP
4.000	3,00	26,87	0,60	1,20	28.246.138
Eje simple tipo	Radio de carga cm	Presión de contacto kg/cm <sup>2</sup>	Distancia entre ejes de llantas cm	Duración de la vida del firme años	
13 t + ruedas gemelas	12,50	6,62	37,50	20,00	

CAPA	MÓDULO ELASTICO kg/cm <sup>2</sup>	COEF. POISSON	ESPESOR	ADHERENCIA /NO ADHERENCIA
M.B.Discontinua	40.000	0,35	3	A
M.B.C	60.000	0,33	6	A
M.B.C	60.000	0,33	9	A
RC	50.000	0,25	35	A
E3 bajo	1.200	0,35		

Deflexión (mm/100)	17,39	Radio de Curvatura (m)	1.496,52	Deformac. inicial < 80 mm/100	<b>VERDADERO</b>
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-18,10	2,18	-9,20	-9,00		
<b>Mezcla Bituminosa - Base</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-17,90	-0,11	51,60	-18,00		
<b>Reciclado</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)	$R_F (kg/cm^2)$	
-35,90	-2,56	36,60	-53,00	-6,93	
<b>Explanada</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-35,90	0,01	101,80	-53,00		

<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-64,65	<b>VERDADERO</b>	<b>3.022.627.968</b>	<b>151,19</b>
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-64,65	<b>VERDADERO</b>	<b>3.148.456.262</b>	<b>152,55</b>
<b>Reciclado con cemento</b>				
Ley de fatiga	$\sigma_r (kg/cm^2)$	Validez	TEP	Años
$\sigma_r = 6,93 \cdot (1-0,058 \cdot \log N)$	-3,94	<b>VERDADERO</b>	<b>75.811.186.467</b>	<b>259,82</b>
<b>Explanada</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_z (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$	351,74	<b>VERDADERO</b>	<b>204.015.982</b>	<b>64,96</b>

## Ficha A3.17. Datos y resultados del cálculo estructural. Categoría T1 y fallo en explanada

## CÁLCULO ANALÍTICO DE FIRMES RECICLADOS

SECCIÓN	T1
---------	----

IMDp carril	% CREC.	F factor crecimiento	Coef. Equiv.	Coef. Mayoración cargas	TEP
2.000	3,00	26,87	0,60	1,20	14.123.069
Eje simple tipo	Radio de carga cm	Presión de contacto kg/cm <sup>2</sup>	Distancia entre ejes de llantas cm	Duración de la vida del firme años	
13 t + ruedas gemelas	12,50	6,62	37,50	20,00	

CAPA	MÓDULO ELASTICO kg/cm <sup>2</sup>	COEF. POISSON	ESPESOR	ADHERENCIA /NO ADHERENCIA
M.B.Discontinua	40.000	0,35	3	A
M.B.C	60.000	0,33	5	A
M.B.C	60.000	0,33	8	A
RC	50.000	0,25	35	A
E3 bajo	1.200	0,35		

Deflexión (mm/100)	17,99	Radio de Curvatura (m)	1.447,54	Deformac. inicial < 80 mm/100	<b>VERDADERO</b>
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-16,20	2,64	-13,80	-8,00		
<b>Mezcla Bituminosa - Base</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-19,90	-0,02	59,70	-16,00		
<b>Reciclado</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)	$R_F (kg/cm^2)$	
-38,50	-2,73	39,00	-51,00	-6,93	
<b>Explanada</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-38,50	0,01	108,90	-51,00		

<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años teóricos
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-78,08	<b>VERDADERO</b>	<b>4.541.267.887</b>	<b>188,15</b>
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-78,08	<b>VERDADERO</b>	<b>2.134.257.341</b>	<b>162,75</b>
<b>Reciclado con cemento</b>				
Ley de fatiga	$\sigma_r (kg/cm^2)$	Validez	TEP	Años
$\sigma_r = 6,93 \cdot (1-0,058 \cdot \log N)$	-4,06	<b>VERDADERO</b>	<b>27.979.043.316</b>	<b>249,55</b>
<b>Explanada</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_z (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$	415,40	<b>VERDADERO</b>	<b>160.358.652</b>	<b>78,41</b>

**Ficha A3.18. Datos y resultados del cálculo estructural. Categoría T21 y fallo en explanada**

**CÁLCULO ANALÍTICO DE FIRMES RECICLADOS**

<b>SECCIÓN</b>	<b>T21</b>
----------------	------------

IMDp carril	% CREC.	F factor crecimiento	Coef. Equiv.	Coef. Mayoración cargas	TEP
800	3,00	26,87	0,60	1,10	5.178.459
Eje simple tipo	Radio de carga cm	Presión de contacto kg/cm <sup>2</sup>	Distancia entre ejes de llantas cm	Duración de la vida del firme años	
13 t + ruedas gemelas	12,50	6,62	37,50	20,00	

CAPA	MÓDULO ELASTICO kg/cm <sup>2</sup>	COEF. POISSON	ESPESOR	ADHERENCIA /NO ADHERENCIA
M.B.C	60.000	0,33	6	A
M.B.C	60.000	0,33	6	A
RC	50.000	0,25	35	A
E3 bajo	1.200	0,35		

Deflexión (mm/100)	19,15	Radio de Curvatura (m)	1.360,21	Deformac. inicial < 80 mm/100	<b>VERDADERO</b>
<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
9,30	3,79	-22,60	-6,00		
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-20,10	1,10	75,20	-12,00		
<b>Reciclado</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)	$R_F (kg/cm^2)$	
-44,50	-2,78	29,00	-47,00	-6,93	
<b>Explanada</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-44,50	0,01	124,40	-47,00		

<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años teóricos
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-102,63	<b>VERDADERO</b>	<b>34.827.775.745</b>	<b>290,89</b>
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-102,63	<b>VERDADERO</b>	<b>2.057.335.612</b>	<b>195,28</b>
<b>Reciclado con cemento</b>				
Ley de fatiga	$\sigma_r (kg/cm^2)$	Validez	TEP	Años
$\sigma_r = 6,93 \cdot (1-0,058 \cdot \log N)$	-4,23	<b>VERDADERO</b>	<b>20.771.139.260</b>	<b>273,41</b>
<b>Explanada</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_z (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{0,28}$	528,50	<b>VERDADERO</b>	<b>99.698.956</b>	<b>94,88</b>

## Ficha A3.19. Datos y resultados del cálculo estructural. Categoría T22 y fallo en explanada

## CÁLCULO ANALÍTICO DE FIRMES RECICLADOS

SECCIÓN	T22
---------	-----

IMDp carril	% CREC.	F factor crecimiento	Coef. Equiv.	Coef. Mayoración cargas	TEP
400	3,00	26,87	0,60	1,10	2.589.229
Eje simple tipo	Radio de carga cm	Presión de contacto kg/cm <sup>2</sup>	Distancia entre ejes de llantas cm	Duración de la vida del firme años	
13 t + ruedas gemelas	12,50	6,62	37,50	20,00	

CAPA	MÓDULO ELÁSTICO kg/cm <sup>2</sup>	COEF. POISSON	ESPESOR	ADHERENCIA /NO ADHERENCIA
M.B.C	60.000	0,33	6	A
M.B.C	60.000	0,33	6	A
RC	50.000	0,25	30	A
E3 bajo	1.200	0,35		

Deflexión (mm/100)	21,07	Radio de Curvatura (m)	1.263,66	Deformac. inicial < 80 mm/100	VERDADERO
Mezcla Bituminosa - Rodadura					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
7,60	4,01	-25,40	-6,00		
Mezcla Bituminosa - Intermedia					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-19,80	1,11	-0,40	-12,00		
Reciclado					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)	$R_F (kg/cm^2)$	
-53,80	-3,33	34,30	-42,00	-6,93	
Explanada					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-53,80	0,01	149,00	-42,00		

Mezcla Bituminosa - Rodadura				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años teóricos
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{0,27243}$	-123,96	VERDADERO	73.068.604.534	339,40
Mezcla Bituminosa - Intermedia				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{0,27243}$	-123,96	VERDADERO	2.174.091.344	220,54
Reciclado con cemento				
Ley de fatiga	$\sigma_r (kg/cm^2)$	Validez	TEP	Años
$\sigma_r = 6,93 \cdot (1-0,058 \cdot \log N)$	-4,35	VERDADERO	894.509.204	190,57
Explanada				
Ley de fatiga	$\epsilon_z (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{0,28}$	624,16	VERDADERO	52.337.435	96,43

**Ficha A3.20. Datos y resultados del cálculo estructural. Categoría T31 y fallo en explanada**

**CÁLCULO ANALÍTICO DE FIRMES RECICLADOS**

<b>SECCIÓN</b>	<b>T31</b>
----------------	------------

IMDp carril	% CREC.	F factor crecimiento	Coef. Equiv.	Coef. Mayoración cargas	TEP
200	3,00	26,87	0,60	1,10	1.294.615
Eje simple tipo	Radio de carga cm	Presión de contacto kg/cm <sup>2</sup>	Distancia entre ejes de llantas cm	Duración de la vida del firme años	
13 t + ruedas gemelas	12,50	6,62	37,50	20,00	

CAPA	MÓDULO ELASTICO kg/cm <sup>2</sup>	COEF. POISSON	ESPESOR	ADHERENCIA /NO ADHERENCIA
M.B.C	60.000	0,33	5	A
M.B.C	60.000	0,33	5	A
RC	50.000	0,25	30	A
E3 bajo	1.200	0,35		

Deflexión (mm/100)	22,03	Radio de Curvatura (m)	1.196,00	Deformac. inicial < 80 mm/100	<b>VERDADERO</b>
<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
0,60	4,94	-30,80	-5,00		
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-19,00	1,74	-9,10	-10,00		
<b>Reciclado</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)	$R_F (kg/cm^2)$	
-58,30	-3,60	36,80	-40,00	-6,93	
<b>Explanada</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-58,30	0,01	161,30	-40,00		

<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años teóricos
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-149,72	<b>VERDADERO</b>	<b>815.150.594.364.936</b>	<b>678,14</b>
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-149,72	<b>VERDADERO</b>	<b>2.529.445.224</b>	<b>249,08</b>
<b>Reciclado con cemento</b>				
Ley de fatiga	$\sigma_r (kg/cm^2)$	Validez	TEP	Años
$\sigma_r = 6,93 \cdot (1-0,058 \cdot \log N)$	-4,47	<b>VERDADERO</b>	<b>192.672.011</b>	<b>162,24</b>
<b>Explanada</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_z (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{0,28}$	737,12	<b>VERDADERO</b>	<b>39.426.072</b>	<b>109,63</b>

## Ficha A3.21. Datos y resultados del cálculo estructural. Categoría T32 y fallo en explanada

## CÁLCULO ANALÍTICO DE FIRMES RECICLADOS

SECCIÓN	T32
---------	-----

IMDp carril	% CREC.	F factor crecimiento	Coef. Equiv.	Coef. Mayoración cargas	TEP
100	3,00	26,87	0,60	1,10	647.307
Eje simple tipo	Radio de carga cm	Presión de contacto kg/cm <sup>2</sup>	Distancia entre ejes de llantas cm	Duración de la vida del firme años	
13 t + ruedas gemelas	12,50	6,62	37,50	20,00	

CAPA	MÓDULO ELÁSTICO kg/cm <sup>2</sup>	COEF. POISSON	ESPESOR	ADHERENCIA /NO ADHERENCIA
M.B.C	60.000	0,33	5	A
M.B.C	60.000	0,33	5	A
RC	50.000	0,25	25	A
E3 bajo	1.200	0,35		

Deflexión (mm/100)	24,68	Radio de Curvatura (m)	1.060,27	Deformac. inicial < 80 mm/100	VERDADERO
<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
30,01	5,28	-35,00	-5,00		
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-18,40	1,75	-10,50	-10,00		
<b>Reciclado</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)	$R_F (kg/cm^2)$	
-72,20	-4,40	44,30	-35,00	-6,93	
<b>Explanada</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-72,20	0,02	197,70	-35,00		

Mezcla Bituminosa - Rodadura				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años teóricos
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-180,84	VERDADERO	472.446.076	215,81
Mezcla Bituminosa - Intermedia				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-180,84	VERDADERO	2.845.633.003	276,51
Reciclado con cemento				
Ley de fatiga	$\sigma_r (kg/cm^2)$	Validez	TEP	Años
$\sigma_r = 6,93 \cdot (1-0,058 \cdot \log N)$	-4,59	VERDADERO	1.936.458	41,52
Explanada				
Ley de fatiga	$\epsilon_z (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$	870,54	VERDADERO	19.061.986	108,54

Ficha A3.22. Datos y resultados del cálculo estructural. Categoría T41 y fallo en explanada

CÁLCULO ANALÍTICO DE FIRMES RECICLADOS

SECCIÓN	T41
---------	-----

IMDp carril	% CREC.	F factor crecimiento	Coef. Equiv.	Coef. Mayoración cargas	TEP
50	3,00	26,87	0,60	1,00	294.231
Eje simple tipo	Radio de carga cm	Presión de contacto kg/cm <sup>2</sup>	Distancia entre ejes de llantas cm	Duración de la vida del firme años	
13 t + ruedas gemelas	12,50	6,62	37,50	20,00	

CAPA	MÓDULO ELASTICO kg/cm <sup>2</sup>	COEF. POISSON	ESPESOR	ADHERENCIA /NO ADHERENCIA
M.B.C	60.000	0,33	4	A
M.B.C	60.000	0,33	4	A
RC	50.000	0,25	25	A
E3 bajo	1.200	0,35		

Deflexión (mm/100)	26,03	Radio de Curvatura (m)	979,93	Deformac. inicial < 80 mm/100	VERDADERO
<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
40,60	6,55	-41,50	-4,00		
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-13,80	2,85	-22,10	-8,00		
<b>Reciclado</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)	$R_F (kg/cm^2)$	
-79,20	-4,80	47,90	-33,00	-6,93	
<b>Explanada</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-79,20	0,02	216,30	-33,00		

Ç

Mezcla Bituminosa - Rodadura				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años teóricos
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-224,17	VERDADERO	155.790.246	204,97
Mezcla Bituminosa - Intermedia				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-224,17	VERDADERO	8.180.643.614	338,90
Reciclado con cemento				
Ley de fatiga	$\sigma_r (kg/cm^2)$	Validez	TEP	Años
$\sigma_r = 6,93 \cdot (1-0,058 \cdot \log N)$	-4,73	FALSO	198.066	14,67
Explanada				
Ley de fatiga	$\epsilon_z (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$	1.051,89	VERDADERO	13.826.250	123,84

## Ficha A3.23. Datos y resultados del cálculo estructural. Categoría T42 y fallo en explanada

## CÁLCULO ANALÍTICO DE FIRMES RECICLADOS

SECCIÓN	T42
---------	-----

IMDp carril	% CREC.	F factor crecimiento	Coef. Equiv.	Coef. Mayoración cargas	TEP
25	3,00	26,87	0,60	1,00	147.115
Eje simple tipo	Radio de carga cm	Presión de contacto kg/cm <sup>2</sup>	Distancia entre ejes de llantas cm	Duración de la vida del firme años	
13 t + ruedas gemelas	12,50	6,62	37,50	20,00	

CAPA	MÓDULO ELÁSTICO kg/cm <sup>2</sup>	COEF. POISSON	ESPESOR	ADHERENCIA /NO ADHERENCIA
M.B.C	60.000	0,33	5	A
RC	50.000	0,25	25	A
E3 bajo	1.200	0,35		

Deflexión (mm/100)	28,43	Radio de Curvatura (m)	853,34	Deformac. inicial < 80 mm/100	<b>VERDADERO</b>
<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
38,40	5,73	-42,70	-5,00		
<b>Reciclado</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)	$R_F (kg/cm^2)$	
-91,90	-5,52	55,30	-30,00	-6,93	
<b>Explanada</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-91,90	0,03	250,20	-30,00		

<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años teóricos
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-270,77	<b>VERDADERO</b>	<b>191.139.906</b>	<b>235,29</b>
<b>Reciclado con cemento</b>				
Ley de fatiga	$\sigma_r (kg/cm^2)$	Validez	TEP	Años
$\sigma_r = 6,93 \cdot (1-0,058 \cdot \log N)$	-4,85	<b>FALSO</b>	<b>3.315</b>	<b>0,61</b>
<b>Explanada</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_z (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$	1.242,27	<b>VERDADERO</b>	<b>8.220.158</b>	<b>129,56</b>

**Ficha A3.24. Datos y resultados del cálculo estructural. Categoría de tráfico T1 y baja calidad explanada**

**CÁLCULO ANALÍTICO DE FIRMES RECICLADOS**

<b>SECCIÓN</b>	<b>T1</b>
----------------	-----------

IMDp carril	% CREC.	F factor crecimiento	Coef. Equiv.	Coef. Mayoración cargas	TEP
2.000	3,00	26,87	0,60	1,20	14.123.069
Eje simple tipo	Radio de carga cm	Presión de contacto kg/cm <sup>2</sup>	Distancia entre ejes de llantas cm	Duración de la vida del firme años	
13 t + ruedas gemelas	12,50	6,62	37,50	20,00	

CAPA	MÓDULO ELÁSTICO kg/cm <sup>2</sup>	COEF. POISSON	ESPESOR	ADHERENCIA /NO ADHERENCIA
M.B.Discontinua	40.000	0,35	3	A
M.B.C	60.000	0,33	8	A
M.B.C	60.000	0,33	9	A
RC	50.000	0,25	35	A
E3	2.000	0,35		

Deflexión (mm/100)	29,75	Radio de Curvatura (m)	1.489,22	Deformac. inicial < 80 mm/100	<b>VERDADERO</b>
Mezcla Bituminosa - Intermedia					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-17,70	1,78	4,30	-11,00		
Mezcla Bituminosa - Base					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-15,40	-0,12	44,00	-20,00		
Reciclado					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)	$R_F (kg/cm^2)$	
-39,60	-2,89	40,20	-55,00	-6,93	
Explanada					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-39,60	0,01	124,00	-55,00		

Mezcla Bituminosa - Rodadura				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años teóricos
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-78,08	<b>VERDADERO</b>	<b>3.281.025.902</b>	<b>177,20</b>
Mezcla Bituminosa - Intermedia				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-78,08	<b>VERDADERO</b>	<b>5.469.037.041</b>	<b>194,42</b>
Reciclado				
Ley de fatiga	$\sigma_r (kg/cm^2)$	Validez	TEP	Años
$\sigma_r = 6,93 \cdot (1-0,058 \cdot \log N)$	-4,06	<b>VERDADERO</b>	<b>11.317.209.725</b>	<b>218,96</b>
Explanada				
Ley de fatiga	$\epsilon_z (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$	415,40	<b>VERDADERO</b>	<b>100.852.333</b>	<b>64,63</b>

**Ficha A3.25. Datos y resultados del cálculo estructural. Categoría de tráfico T21 y baja calidad explanada**

**CÁLCULO ANALÍTICO DE FIRMES RECICLADOS**

<b>SECCIÓN</b>	<b>T21</b>
----------------	------------

IMDp carril	% CREC.	F factor crecimiento	Coef. Equiv.	Coef. Mayoración cargas	TEP
800	3,00	26,87	0,60	1,10	5.178.459
Eje simple tipo	Radio de carga cm	Presión de contacto kg/cm <sup>2</sup>	Distancia entre ejes de llantas cm	Duración de la vida del firme años	
13 t + ruedas gemelas	12,50	6,62	37,50	20,00	

CAPA	MÓDULO ELÁSTICO kg/cm <sup>2</sup>	COEF. POISSON	ESPESOR	ADHERENCIA /NO ADHERENCIA
M.B.C	60.000	0,33	6	A
M.B.C	60.000	0,33	9	A
RC	50.000	0,25	35	A
E3	2.000	0,35		

Deflexión (mm/100)	32,23	Radio de Curvatura (m)	1.383,11	Deformac. inicial < 80 mm/100	<b>VERDADERO</b>
<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
8,10	4,05	-25,40	-6,00		
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-17,30	0,83	59,90	-15,00		
<b>Reciclado</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)	$R_F (kg/cm^2)$	
-47,60	-3,03	30,20	-50,00	-6,93	
<b>Explanada</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-47,60	0,01	146,90	-50,00		

<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años teóricos
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-102,63	<b>VERDADERO</b>	<b>57.830.667.032</b>	<b>308,04</b>
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-102,63	<b>VERDADERO</b>	<b>3.568.198.253</b>	<b>213,86</b>
<b>Reciclado</b>				
Ley de fatiga	$\sigma_r (kg/cm^2)$	Validez	TEP	Años
$\sigma_r = 6,93 \cdot (1-0,058 \cdot \log N)$	-4,23	<b>VERDADERO</b>	<b>4.931.613.166</b>	<b>224,80</b>
<b>Explanada</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_z (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$	528,50	<b>VERDADERO</b>	<b>55.059.012</b>	<b>76,41</b>

**Ficha A3.26. Datos y resultados del cálculo estructural. Categoría de tráfico T22 y baja calidad explanada**

**CÁLCULO ANALÍTICO DE FIRMES RECICLADOS**

<b>SECCIÓN</b>	<b>T22</b>
----------------	------------

IMDp carril	% CREC.	F factor crecimiento	Coef. Equiv.	Coef. Mayoración cargas	TEP
400	3,00	26,87	0,60	1,10	2.589.229
Eje simple tipo	Radio de carga cm	Presión de contacto kg/cm <sup>2</sup>	Distancia entre ejes de llantas cm	Duración de la vida del firme años	
13 t + ruedas gemelas	12,50	6,62	37,50	20,00	

CAPA	MÓDULO ELASTICO kg/cm <sup>2</sup>	COEF. POISSON	ESPESOR	ADHERENCIA / NO ADHERENCIA
M.B.C	60.000	0,33	6	A
M.B.C	60.000	0,33	6	A
RC	50.000	0,25	35	A
E3	2.000	0,35		

Deflexión (mm/100)	34,21	Radio de Curvatura (m)	1.297,53	Deformac. inicial < 80 mm/100	<b>VERDADERO</b>
<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
6,80	4,22	-27,50	-6,00		
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-18,60	1,36	-2,50	-12,00		
<b>Reciclado</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)	$R_F (kg/cm^2)$	
-53,20	-3,38	33,50	-47,00	-6,93	
<b>Explanada</b>					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-53,20	0,01	164,00	-47,00		

<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años teóricos
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-123,96	<b>VERDADERO</b>	<b>109.911.020.461</b>	<b>353,21</b>
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-123,96	<b>VERDADERO</b>	<b>2.734.920.202</b>	<b>228,30</b>
<b>Reciclado</b>				
Ley de fatiga	$\sigma_r (kg/cm^2)$	Validez	TEP	Años
$\sigma_r = 6,93 \cdot (1-0,058 \cdot \log N)$	-4,35	<b>VERDADERO</b>	<b>699.203.627</b>	<b>182,27</b>
<b>Explanada</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_z (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{0,28}$	624,16	<b>VERDADERO</b>	<b>37.156.549</b>	<b>85,63</b>

**Ficha A3.27. Datos y resultados del cálculo estructural. Categoría de tráfico T31 y baja calidad explanada**

**CÁLCULO ANALÍTICO DE FIRMES RECICLADOS**

<b>SECCIÓN</b>	<b>T31</b>
----------------	------------

IMDp carril	% CREC.	F factor crecimiento	Coef. Equiv.	Coef. Mayoración cargas	TEP
200	3,00	26,87	0,60	1,10	1.294.615
Eje simple tipo	Radio de carga cm	Presión de contacto kg/cm <sup>2</sup>	Distancia entre ejes de llantas cm	Duración de la vida del firme años	
13 t + ruedas gemelas	12,50	6,62	37,50	20,00	

CAPA	MÓDULO ELÁSTICO kg/cm <sup>2</sup>	COEF. POISSON	ESPESOR	ADHERENCIA /NO ADHERENCIA
M.B.C	60.000	0,33	5	A
M.B.C	60.000	0,33	5	A
RC	50.000	0,25	35	A
E3	2.000	0,35		

Deflexión (mm/100)	35,68	Radio de Curvatura (m)	1.236,60	Deformac. inicial < 80 mm/100	<b>VERDADERO</b>
<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>					
$\epsilon_r$ (10 <sup>-6</sup> )	$\sigma_r$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_z$ (10 <sup>-6</sup> )	cota (cm)		
27,50	5,16	-33,00	-5,00		
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>					
$\epsilon_r$ (10 <sup>-6</sup> )	$\sigma_r$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_z$ (10 <sup>-6</sup> )	cota (cm)		
-17,80	2,00	-11,40	-10,00		
<b>Reciclado</b>					
$\epsilon_r$ (10 <sup>-6</sup> )	$\sigma_r$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_z$ (10 <sup>-6</sup> )	cota (cm)	R <sub>F</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	
-57,40	-3,63	35,90	-45,00	-6,93	
<b>Explanada</b>					
$\epsilon_r$ (10 <sup>-6</sup> )	$\sigma_r$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_z$ (10 <sup>-6</sup> )	cota (cm)		
-57,40	0,01	177,00	-45,00		

<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r$ (10 <sup>-6</sup> )	Validez	TEP	Años teóricos
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-149,72	<b>VERDADERO</b>	<b>651.017.691</b>	<b>203,23</b>
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r$ (10 <sup>-6</sup> )	Validez	TEP	Años
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-149,72	<b>VERDADERO</b>	<b>3.213.871.470</b>	<b>257,18</b>
<b>Reciclado</b>				
Ley de fatiga	$\sigma_r$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Validez	TEP	Años
$\sigma_r = 6,93 \cdot (1-0,058 \cdot \log N)$	-4,47	<b>VERDADERO</b>	<b>158.572.871</b>	<b>155,71</b>
<b>Explanada</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_z$ (10 <sup>-6</sup> )	Validez	TEP	Años
$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{0,28}$	737,12	<b>VERDADERO</b>	<b>28.295.412</b>	<b>98,93</b>

**Ficha A3.28. Datos y resultados del cálculo estructural. Categoría de tráfico T32 y baja calidad explanada**

**CÁLCULO ANALÍTICO DE FIRMES RECICLADOS**

<b>SECCIÓN</b>	<b>T32</b>
----------------	------------

IMDp carril	% CREC.	F factor crecimiento	Coef. Equiv.	Coef. Mayoración cargas	TEP
100	3,00	26,87	0,60	1,10	647.307
Eje simple tipo	Radio de carga cm	Presión de contacto kg/cm <sup>2</sup>	Distancia entre ejes de llantas cm	Duración de la vida del firme años	
13 t + ruedas gemelas	12,50	6,62	37,50	20,00	

CAPA	MÓDULO ELÁSTICO kg/cm <sup>2</sup>	COEF. POISSON	ESPESOR	ADHERENCIA /NO ADHERENCIA
M.B.C	60.000	0,33	5	A
M.B.C	60.000	0,33	5	A
RC	50.000	0,25	30	A
E3	2.000	0,35		

Deflexión (mm/100)	39,70	Radio de Curvatura (m)	1.119,51	Deformac. inicial < 80 mm/100	<b>VERDADERO</b>
Mezcla Bituminosa - Rodadura					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
32,30	5,54	-37,50	-5,00		
Mezcla Bituminosa - Intermedia					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-16,90	2,10	-13,50	-10,00		
Reciclado					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)	$R_F (kg/cm^2)$	
-70,10	-4,40	43,00	-40,00	-6,93	
Explanada					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-70,10	0,01	215,40	-40,00		

Mezcla Bituminosa - Rodadura				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años teóricos
$\epsilon_r = - 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-180,84	<b>VERDADERO</b>	<b>360.681.501</b>	<b>206,69</b>
Mezcla Bituminosa - Intermedia				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_r = - 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-180,84	<b>VERDADERO</b>	<b>3.888.129.776</b>	<b>287,06</b>
Reciclado				
Ley de fatiga	$\sigma_r (kg/cm^2)$	Validez	TEP	Años
$\sigma_r = 6,93 \cdot (1-0,058 \cdot \log N)$	-4,59	<b>VERDADERO</b>	<b>1.925.396</b>	<b>41,38</b>
Explanada				
Ley de fatiga	$\epsilon_z (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{0,28}$	870,54	<b>VERDADERO</b>	<b>14.033.681</b>	<b>98,67</b>

**Ficha A3.29. Datos y resultados del cálculo estructural. Categoría de tráfico T41 y baja calidad explanada**

**CÁLCULO ANALÍTICO DE FIRMES RECICLADOS**

<b>SECCIÓN</b>	<b>T41</b>
----------------	------------

IMDp carril	% CREC.	F factor crecimiento	Coef. Equiv.	Coef. Mayoración cargas	TEP
50	3,00	26,87	0,60	1,00	294.231
Eje simple tipo	Radio de carga cm	Presión de contacto kg/cm <sup>2</sup>	Distancia entre ejes de llantas cm	Duración de la vida del firme años	
13 t + ruedas gemelas	12,50	6,62	37,50	20,00	

CAPA	MÓDULO ELÁSTICO kg/cm <sup>2</sup>	COEF. POISSON	ESPESOR	ADHERENCIA /NO ADHERENCIA
M.B.C	60.000	0,33	4	A
M.B.C	60.000	0,33	4	A
RC	50.000	0,25	30	A
E3	2.000	0,35		

Deflexión (mm/100)	41,74	Radio de Curvatura (m)	1.044,73	Deformac. inicial < 80 mm/100	<b>VERDADERO</b>
<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>					
$\epsilon_r$ (10 <sup>-6</sup> )	$\sigma_r$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_z$ (10 <sup>-6</sup> )	cota (cm)		
42,50	6,81	-44,10	-4,00		
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>					
$\epsilon_r$ (10 <sup>-6</sup> )	$\sigma_r$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_z$ (10 <sup>-6</sup> )	cota (cm)		
-12,40	3,21	-25,40	-8,00		
<b>Reciclado</b>					
$\epsilon_r$ (10 <sup>-6</sup> )	$\sigma_r$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_z$ (10 <sup>-6</sup> )	cota (cm)	R <sub>F</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	
-76,60	-4,79	46,50	-38,00	-6,93	
<b>Explanada</b>					
$\epsilon_r$ (10 <sup>-6</sup> )	$\sigma_r$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_z$ (10 <sup>-6</sup> )	cota (cm)		
-76,60	0,02	235,20	-38,00		

<b>Mezcla Bituminosa - Rodadura</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r$ (10 <sup>-6</sup> )	Validez	TEP	Años teóricos
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-224,17	<b>VERDADERO</b>	<b>131.713.464</b>	<b>199,31</b>
<b>Mezcla Bituminosa - Intermedia</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_r$ (10 <sup>-6</sup> )	Validez	TEP	Años
$\epsilon_r = -6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-224,17	<b>VERDADERO</b>	<b>12.114.825.280</b>	<b>352,18</b>
<b>Reciclado</b>				
Ley de fatiga	$\sigma_r$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Validez	TEP	Años
$\sigma_r = 6,93 \cdot (1-0,058 \cdot \log N)$	-4,73	<b>FALSO</b>	<b>210.949</b>	<b>15,43</b>
<b>Explanada</b>				
Ley de fatiga	$\epsilon_z$ (10 <sup>-6</sup> )	Validez	TEP	Años
$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{0,28}$	1.051,89	<b>VERDADERO</b>	<b>10.251.159</b>	<b>114,02</b>

**Ficha A3.30. Datos y resultados del cálculo estructural. Categoría de tráfico T42 y baja calidad explanada**

**CÁLCULO ANALÍTICO DE FIRMES RECICLADOS**

<b>SECCIÓN</b>	<b>T42</b>
----------------	------------

IMDp carril	% CREC.	F factor crecimiento	Coef. Equiv.	Coef. Mayoración cargas	TEP
25	3,00	26,87	0,60	1,00	147.115
Eje simple tipo	Radio de carga cm	Presión de contacto kg/cm <sup>2</sup>	Distancia entre ejes de llantas cm	Duración de la vida del firme años	
13 t + ruedas gemelas	12,50	6,62	37,50	20,00	

CAPA	MÓDULO ELÁSTICO kg/cm <sup>2</sup>	COEF. POISSON	ESPESOR	ADHERENCIA /NO ADHERENCIA
M.B.C	60.000	0,33	5	A
RC	50.000	0,25	30	A
E3	2.000	0,35		

Deflexión (mm/100)	45,30	Radio de Curvatura (m)	928,75	Deformac. inicial < 80 mm/100	<b>VERDADERO</b>
Mezcla Bituminosa - Rodadura					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
41,20	6,07	-46,00	-5,00		
Reciclado					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)	$R_F (kg/cm^2)$	
-88,20	-5,48	52,70	-35,00	-6,93	
Explanada					
$\epsilon_r (10^{-6})$	$\sigma_r (kg/cm^2)$	$\epsilon_z (10^{-6})$	cota (cm)		
-88,20	0,02	271,30	-35,00		

Mezcla Bituminosa - Rodadura				
Ley de fatiga	$\epsilon_r (10^{-6})$	Validez	TEP	Años teóricos
$\epsilon_r = - 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	-270,77	<b>VERDADERO</b>	<b>147.622.913</b>	<b>226,56</b>
Reciclado				
Ley de fatiga	$\sigma_r (kg/cm^2)$	Validez	TEP	Años
$\sigma_r = 6,93 \cdot (1-0,058 \cdot \log N)$	-4,85	<b>FALSO</b>	<b>4.027</b>	<b>0,74</b>
Explanada				
Ley de fatiga	$\epsilon_z (10^{-6})$	Validez	TEP	Años
$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$	1.242,27	<b>VERDADERO</b>	<b>6.156.018</b>	<b>120,02</b>

## ANEJO 4



## FICHAS DE ROTURA DE PROBETAS CILÍNDRICAS



## ÍNDICE

A4.1. ROTURA A COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETAS A LOS 7 DÍAS

A4.2. ROTURA A COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETAS A LOS 28 DÍAS

A4.3. ROTURA A COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETAS A LOS 90 DÍAS

A4.4. ROTURA A TRACCIÓN INDIRECTA DE PROBETAS A LOS 7 DÍAS

A4.5. ROTURA A TRACCIÓN INDIRECTA DE PROBETAS A LOS 28 DÍAS

A4.6. ROTURA A TRACCIÓN INDIRECTA DE PROBETAS A LOS 90 DÍAS



### A4.1. ROTURA A COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETAS A LOS 7 DÍAS

ENSAYO DE COMPRESIÓN	
Tipo de probeta	Cilíndrica
Nº de probeta	A1.1
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	27/11/2007
Fecha ensayo	04/12/2007
Edad de la probeta (Días)	7
Altura (mm)	180
Diámetro (mm)	150
Refrentado	Azufre
Peso probeta (Kg)	7,279
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,153
Carga de rotura (kN)	55,17
Tensión de rotura (MPa)	3,122

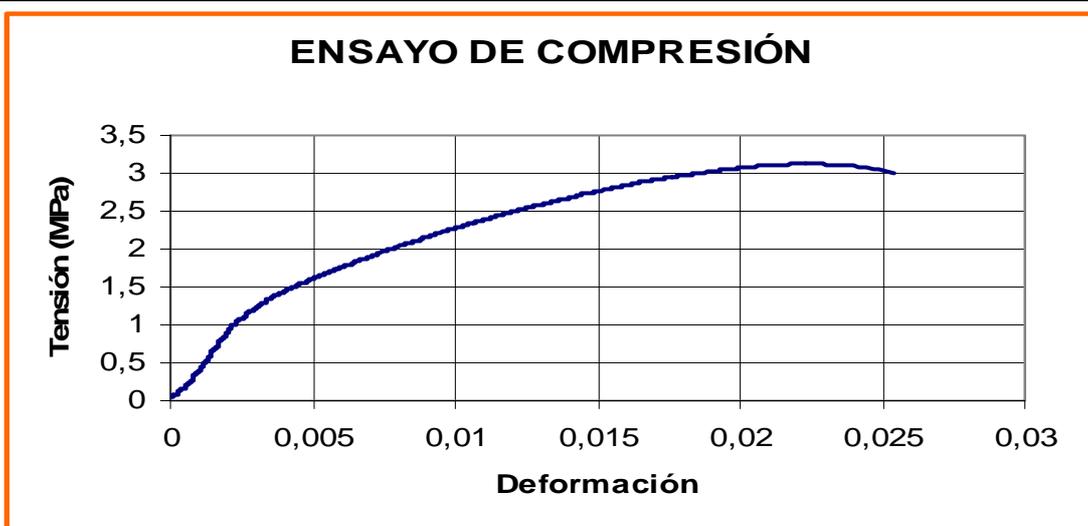
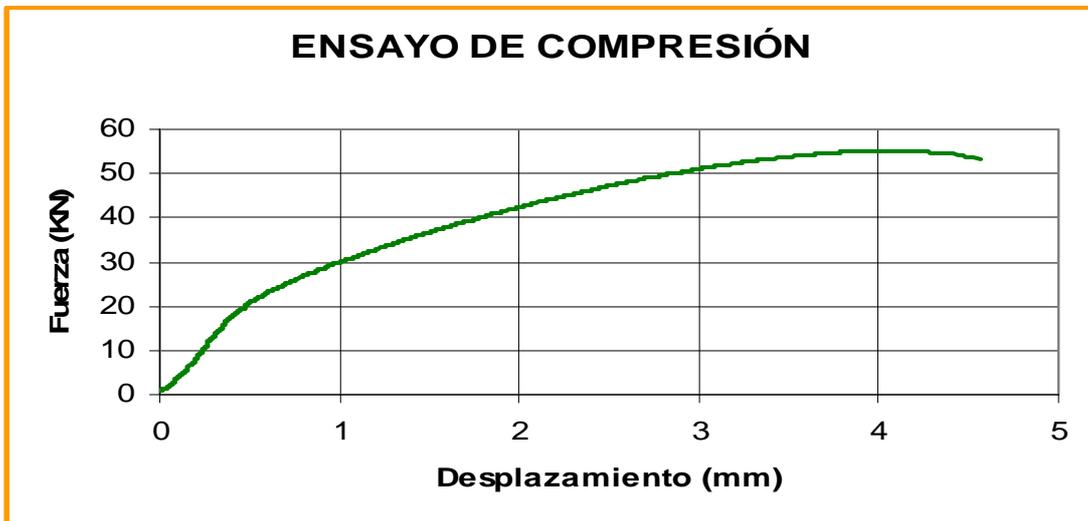
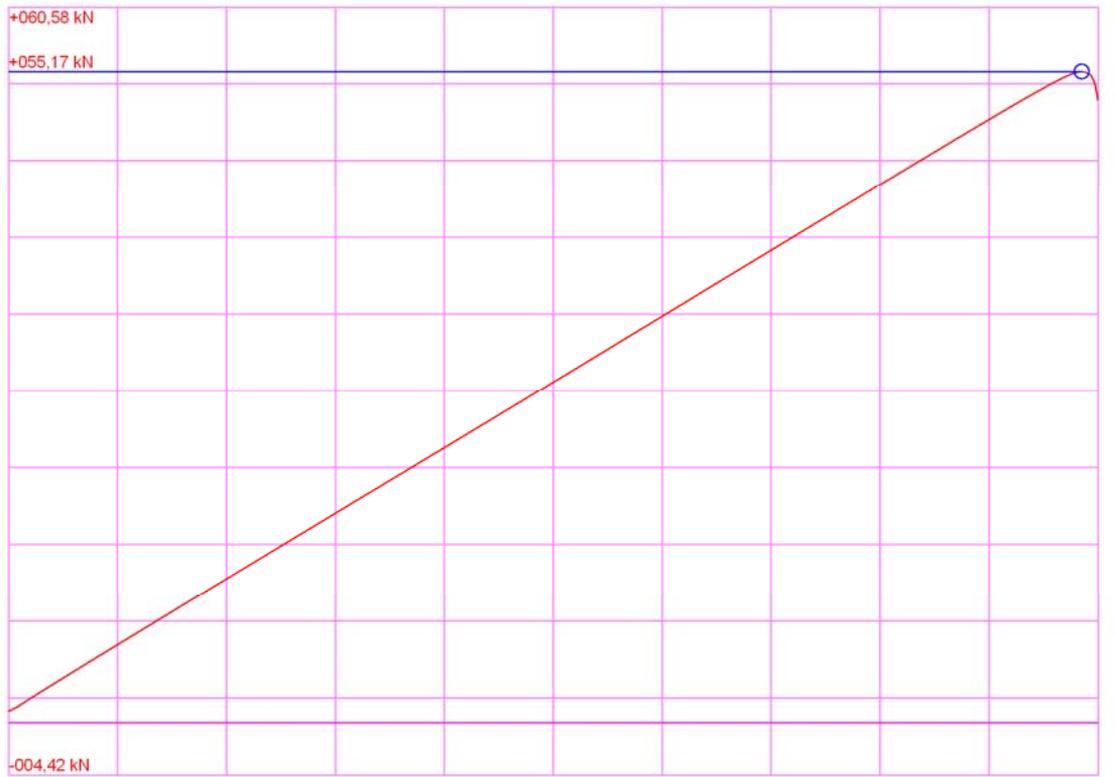


GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA



OBSERVACIONES

ENSAYO DE COMPRESIÓN	
Tipo de probeta	Cilíndrica
Nº de probeta	A1.2
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	27/11/2007
Fecha ensayo	04/12/2007
Edad de la probeta (Días)	7
Altura (mm)	180
Diámetro (mm)	150
Refrentado	Azufre
Peso probeta (Kg)	7,224
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,151
Carga de rotura (kN)	53,16
Tensión de rotura (MPa)	3,008

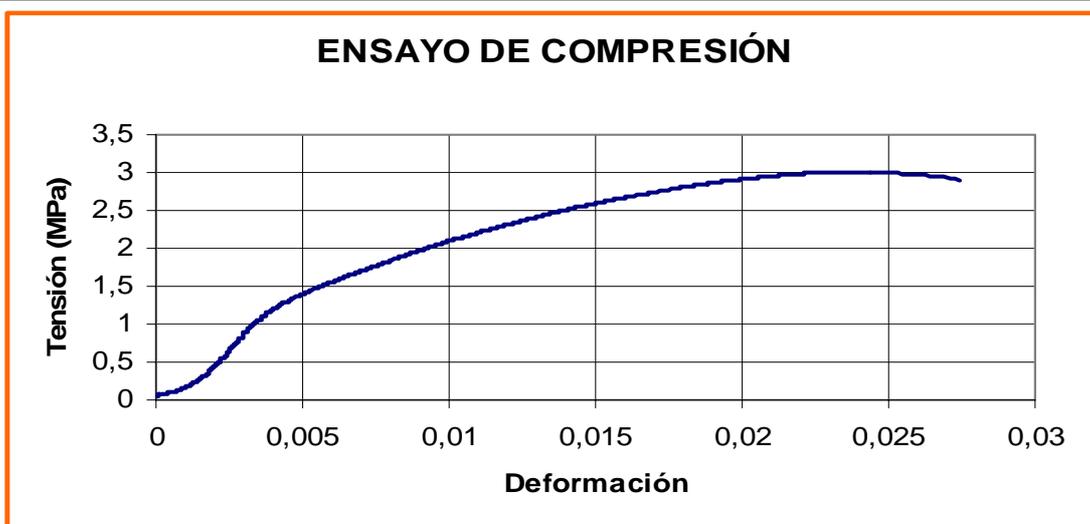
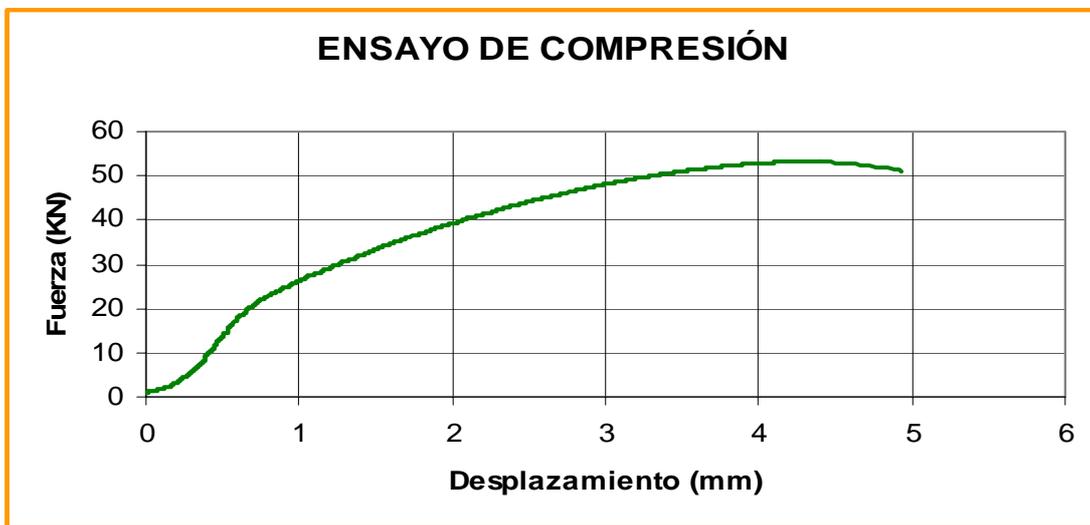
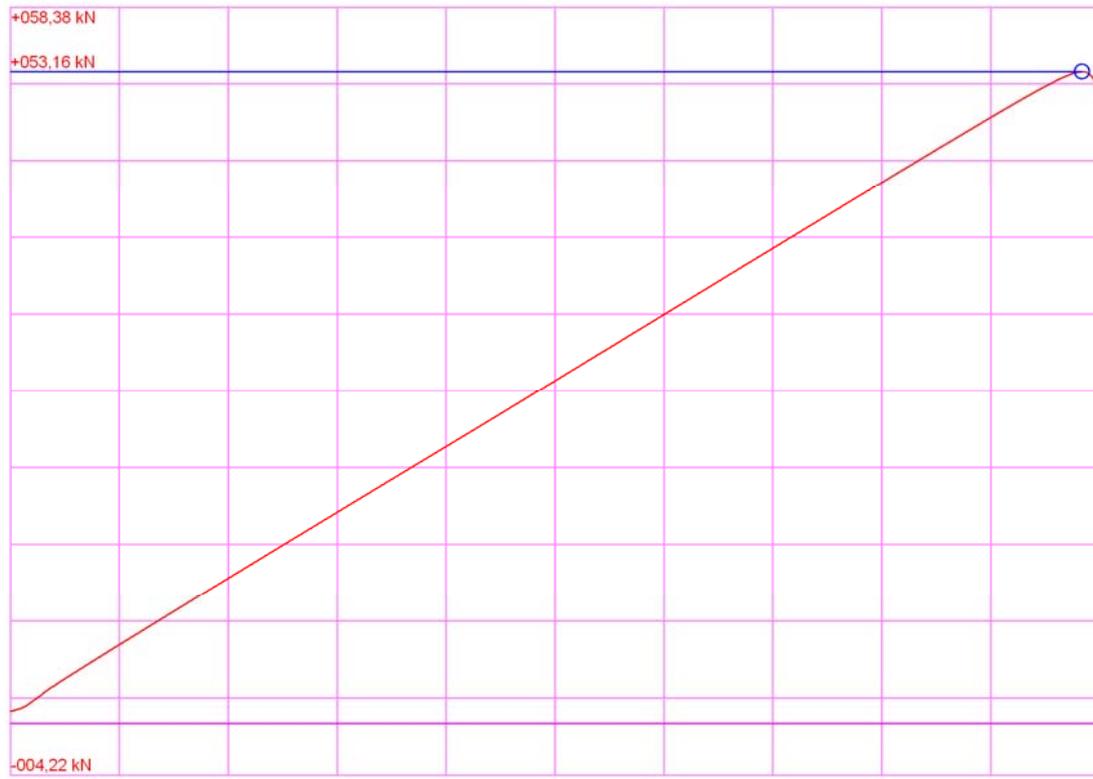


GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA



OBSERVACIONES

ENSAYO DE COMPRESIÓN	
Tipo de probeta	Cilíndrica
Nº de probeta	A1.3
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	27/11/2007
Fecha ensayo	04/12/2007
Edad de la probeta (Días)	7
Altura (mm)	180
Diámetro (mm)	150
Refrentado	Azufre
Peso probeta (Kg)	7208
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,153
Carga de rotura (kN)	51,01
Tensión de rotura (MPa)	2,887

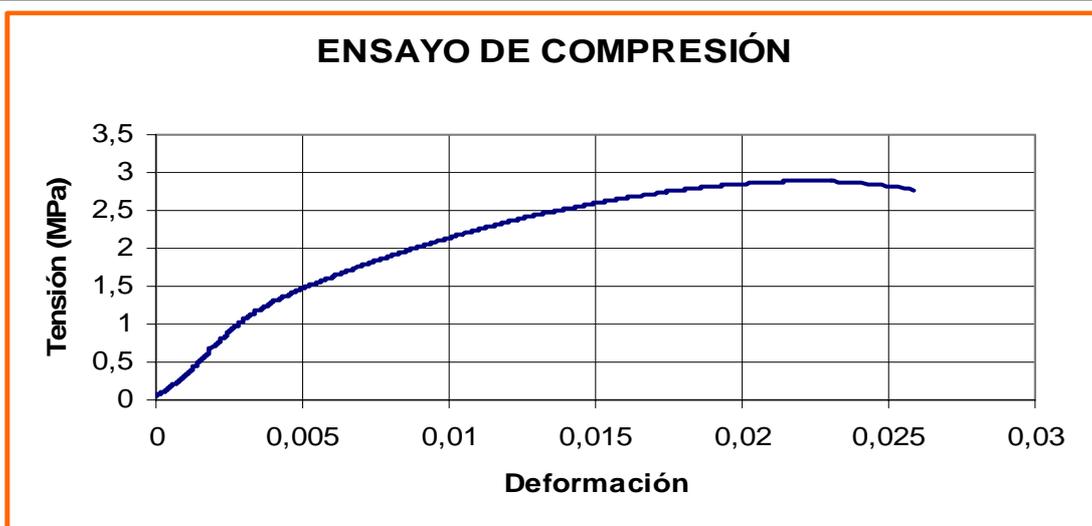
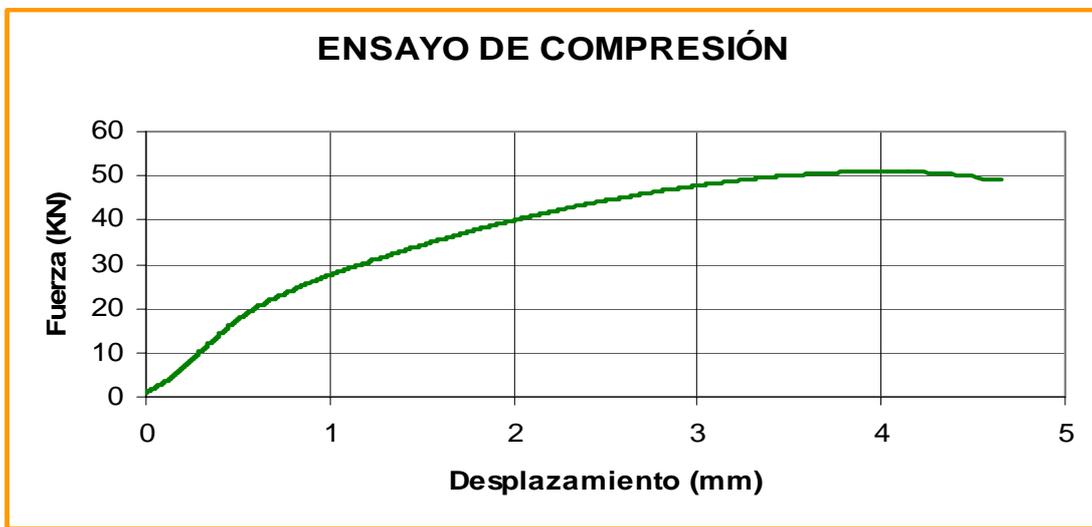
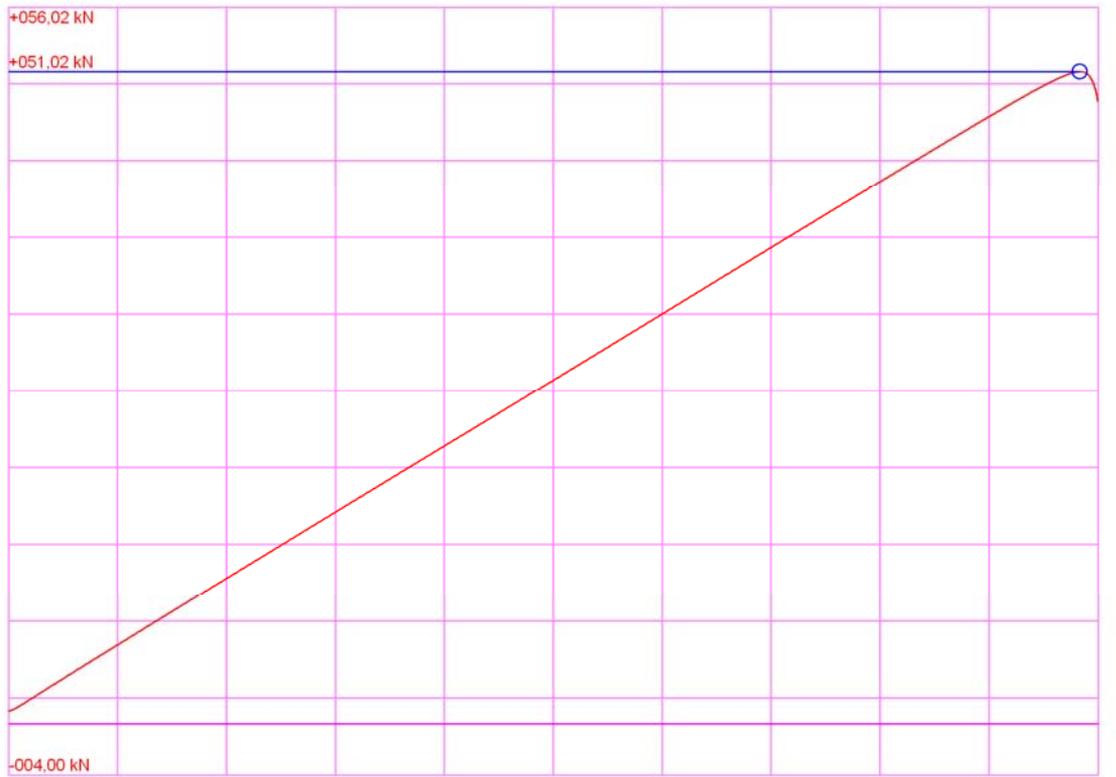


GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA



OBSERVACIONES

ENSAYO DE COMPRESIÓN	
Tipo de probeta	Cilíndrica
Nº de probeta	A2.1
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	28/11/2007
Fecha ensayo	5/12/2007
Edad de la probeta (Días)	7
Altura (mm)	180
Diámetro (mm)	150
Refrentado	Azufre
Peso probeta (Kg)	7,159
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,119
Carga de rotura (kN)	41,12
Tensión de rotura (MPa)	2,327

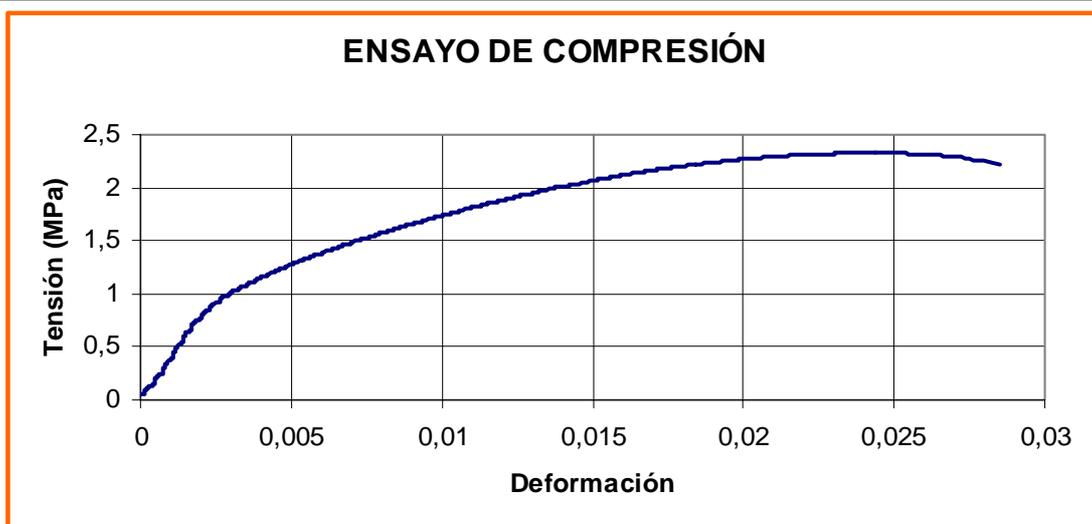
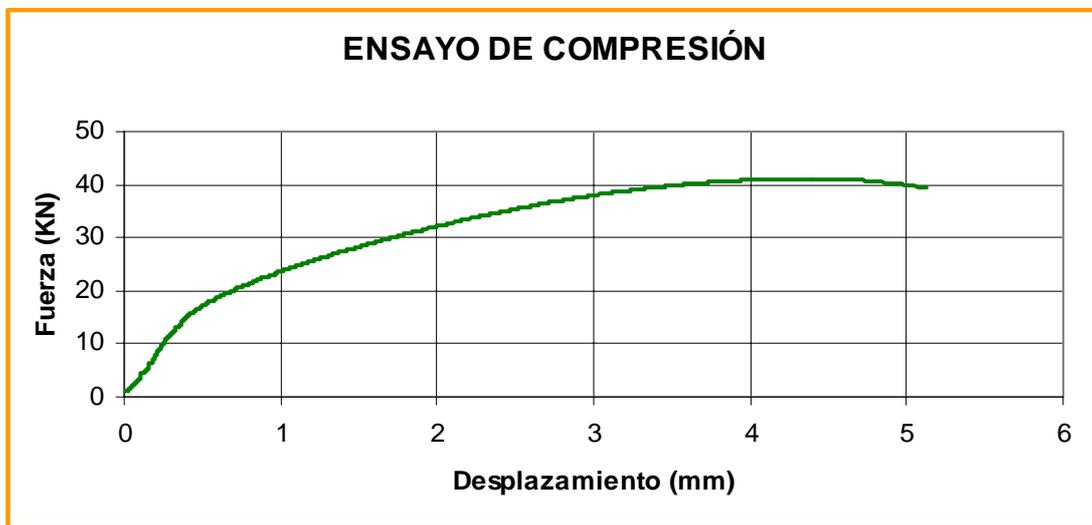
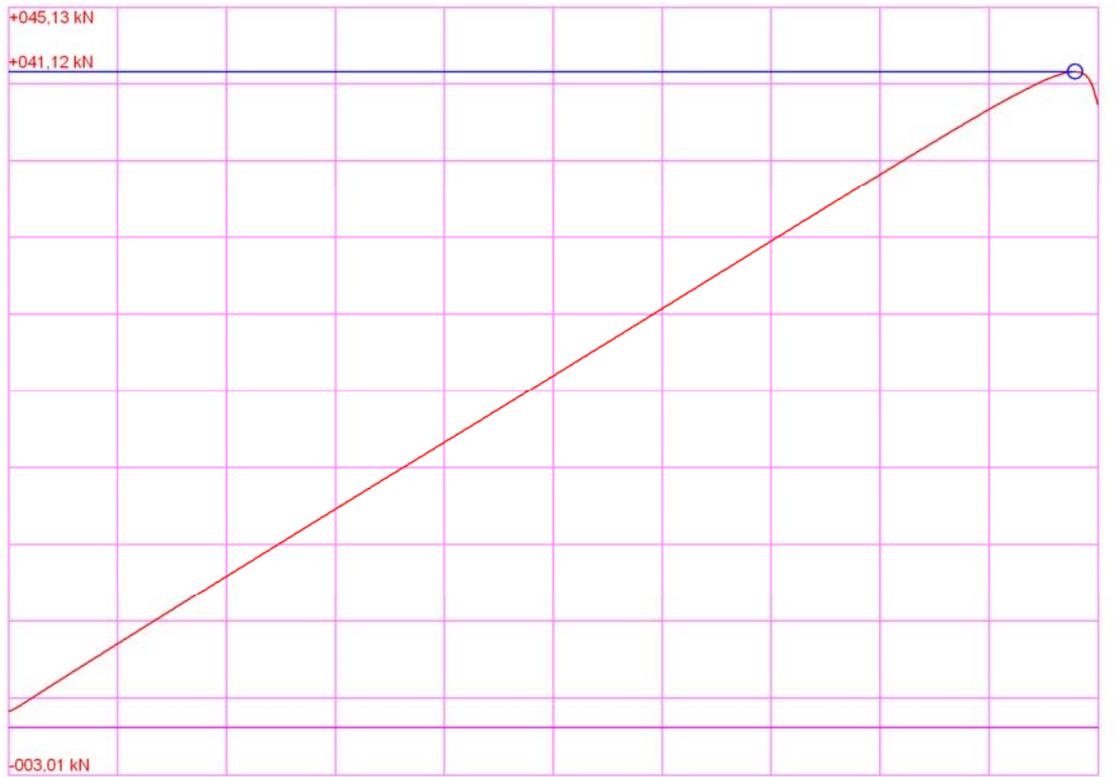


GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA



OBSERVACIONES

ENSAYO DE COMPRESIÓN	
Tipo de probeta	Cilíndrica
Nº de probeta	A2.2
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	27/11/2007
Fecha ensayo	04/12/2007
Edad de la probeta (Días)	7
Altura (mm)	180
Diámetro (mm)	150
Refrentado	Azufre
Peso probeta (Kg)	7132
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,121
Carga de rotura (kN)	36,94
Tensión de rotura (MPa)	2,090

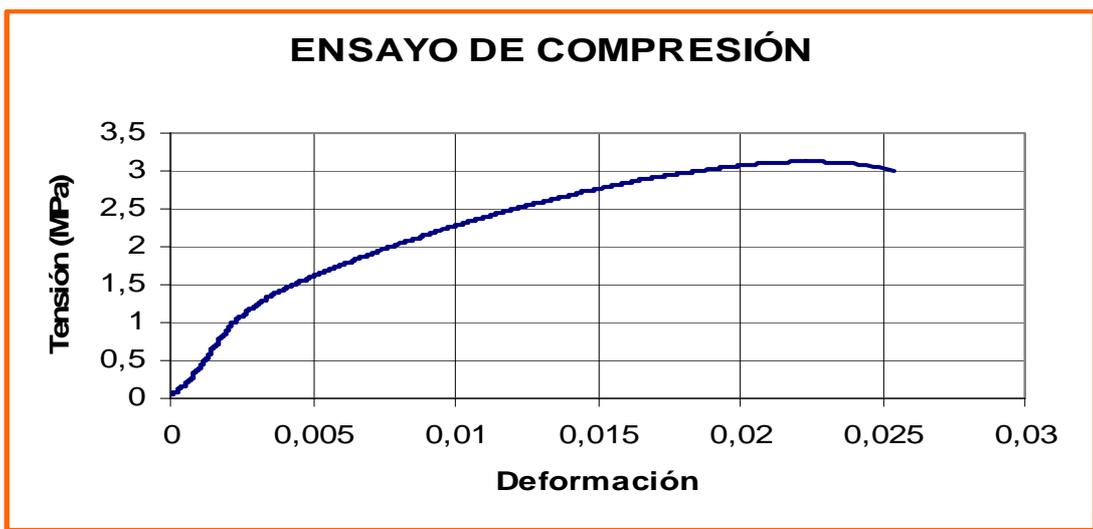
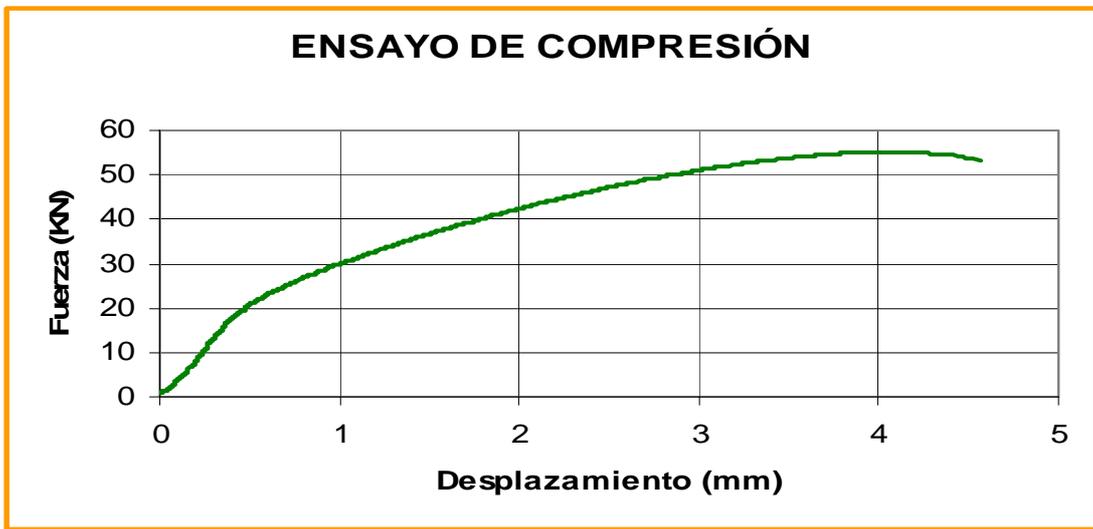
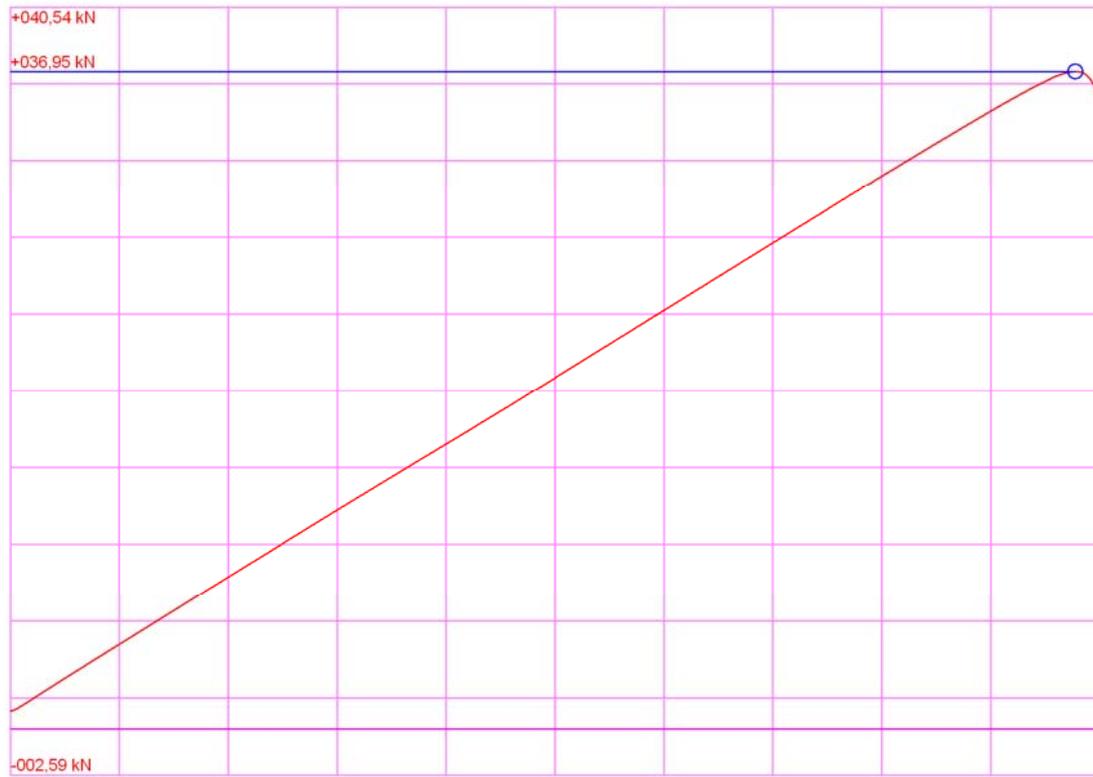


GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA



OBSERVACIONES

ENSAYO DE COMPRESIÓN	
Tipo de probeta	Cilíndrica
Nº de probeta	A2.3
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	28/11/2007
Fecha ensayo	05/12/2007
Edad de la probeta (Días)	7
Altura (mm)	180
Diámetro (mm)	150
Refrentado	Azufre
Peso probeta (g)	7124
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,107847316
Carga de rotura (kN)	40,12
Tensión de rotura (MPa)	2,27031

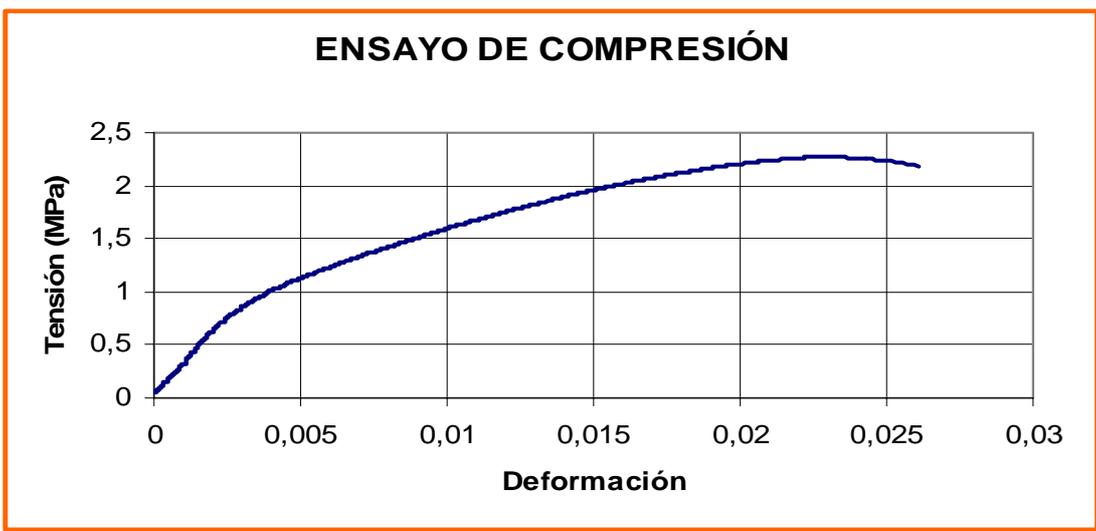
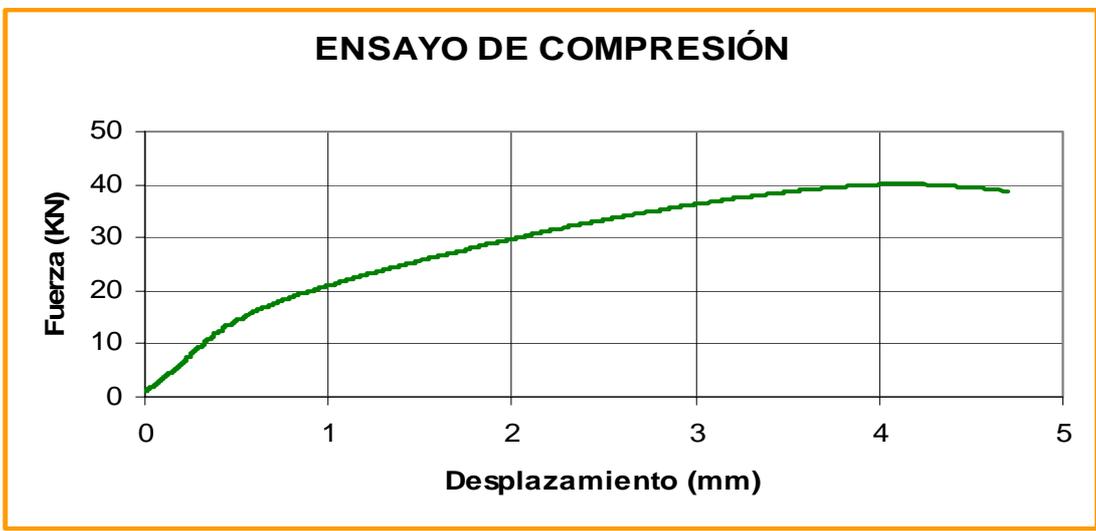
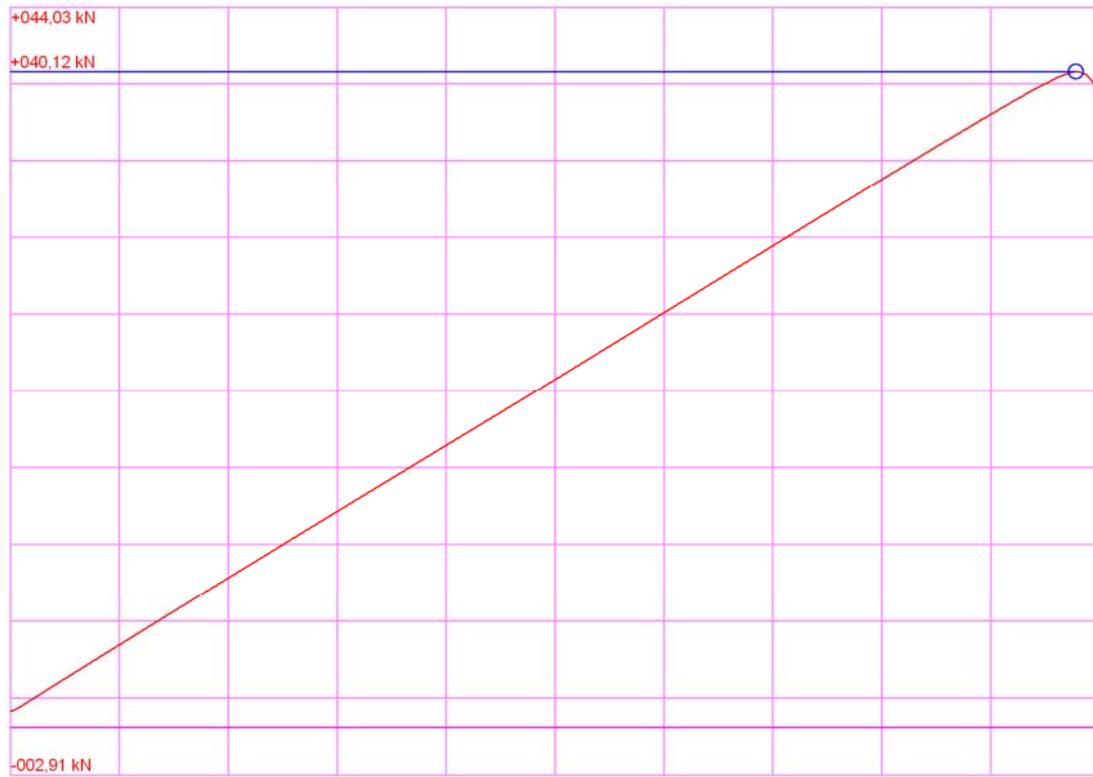


GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA



OBSERVACIONES

### A4.2. ROTURA A COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETAS A LOS 28 DÍAS

ENSAYO DE COMPRESIÓN	
Tipo de probeta	Cilíndrica
Nº de probeta	A2.5
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	28/11/2007
Fecha ensayo	26/12/2007
Edad de la probeta (Días)	28
Altura (mm)	180
Diámetro (mm)	150
Refrentado	Azufre
Peso probeta (Kg)	7,090
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,127
Carga de rotura (kN)	52,96
Tensión de rotura (MPa)	2,997

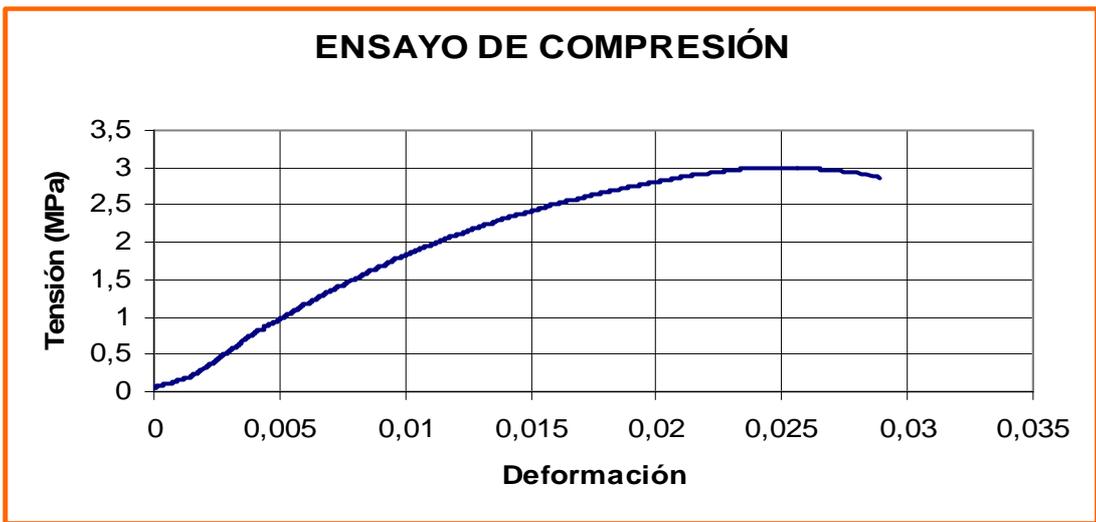
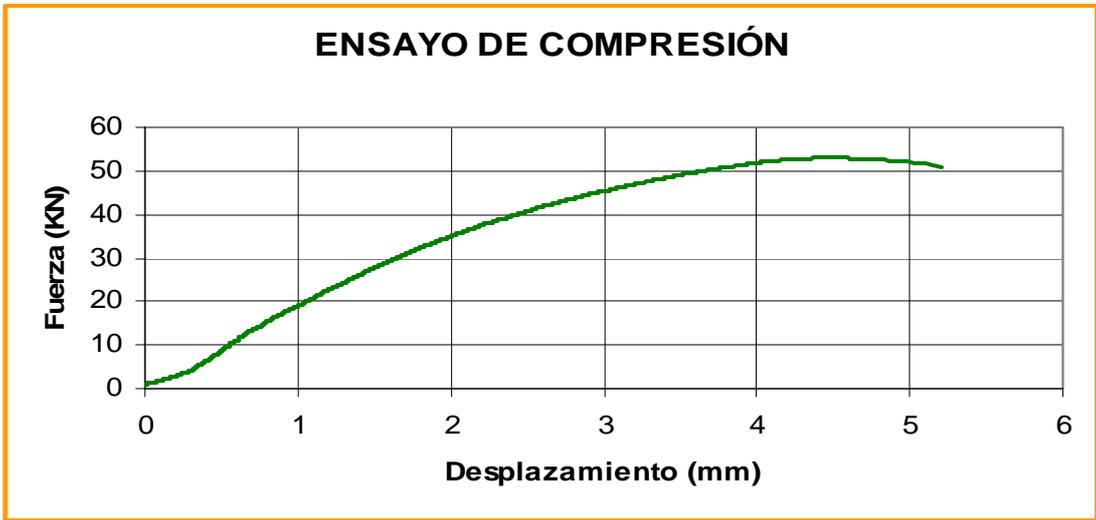
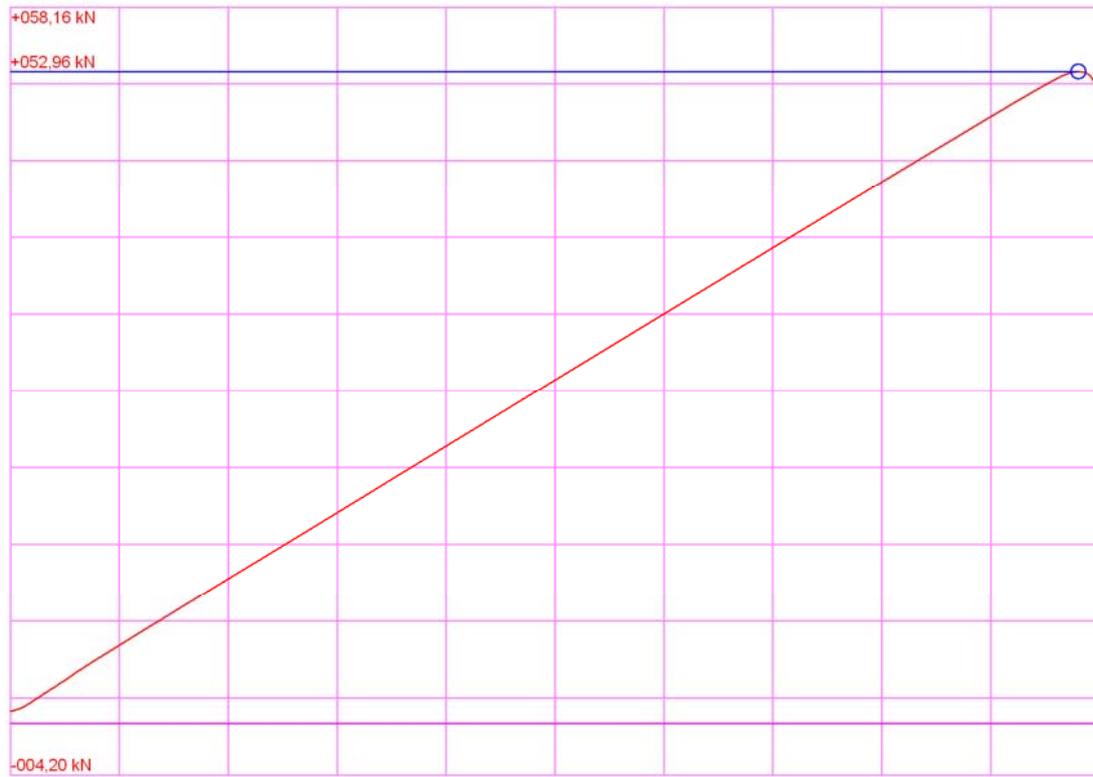


GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA



OBSERVACIONES

ENSAYO DE COMPRESIÓN	
Tipo de probeta	Cilíndrica
Nº de probeta	A3.1
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	29/11/2007
Fecha ensayo	27/12/2007
Edad de la probeta (Días)	28
Altura (mm)	180
Diámetro (mm)	150
Refrentado	Azufre
Peso probeta (kg)	7,118
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,141
Carga de rotura (kN)	55,39
Tensión de rotura (MPa)	3,134

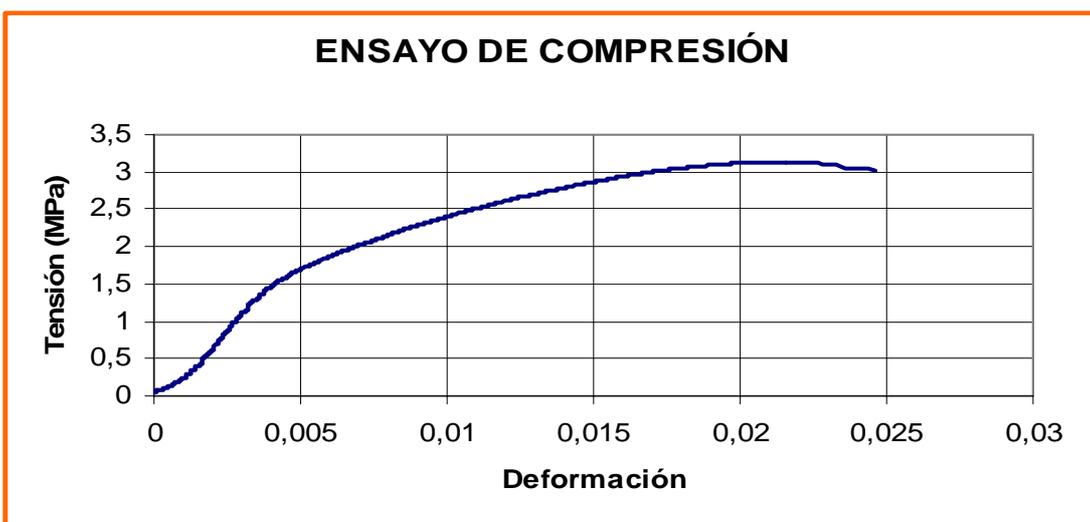
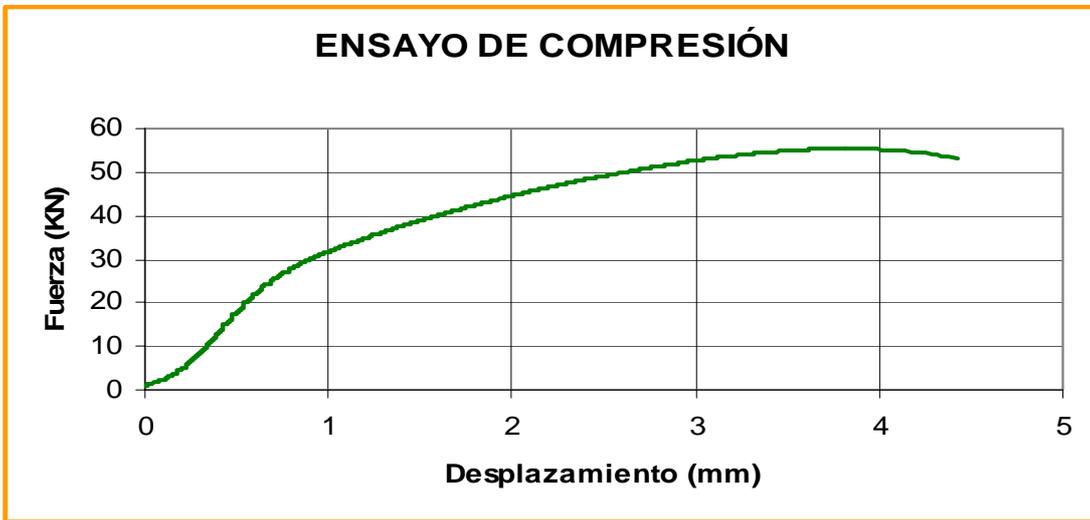
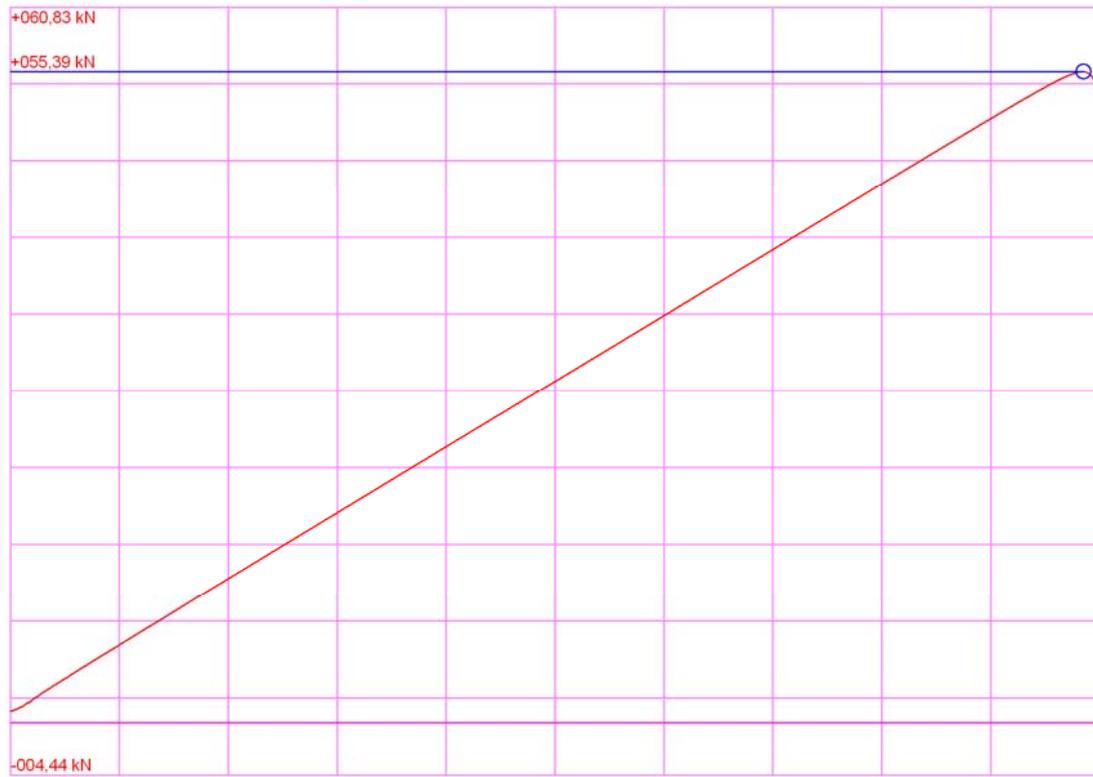


GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA



OBSERVACIONES

ENSAYO DE COMPRESIÓN	
Tipo de probeta	Cilíndrica
Nº de probeta	A3.2
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	29/11/2007
Fecha ensayo	27/12/2007
Edad de la probeta (Días)	28
Altura (mm)	180
Diámetro (mm)	150
Refrentado	Azufre
Peso probeta (Kg)	7,034
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,125
Carga de rotura (kN)	59,59
Tensión de rotura (MPa)	3,372

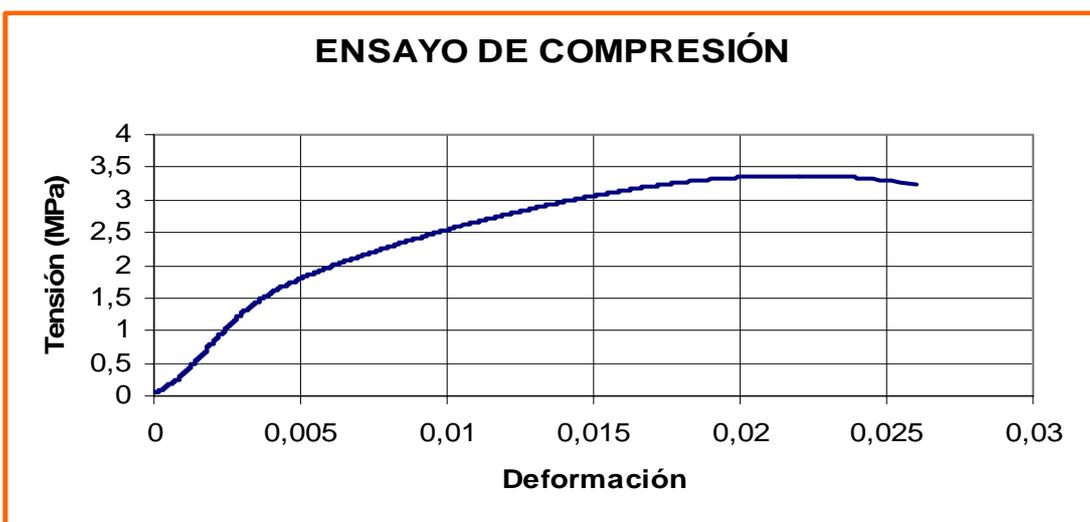
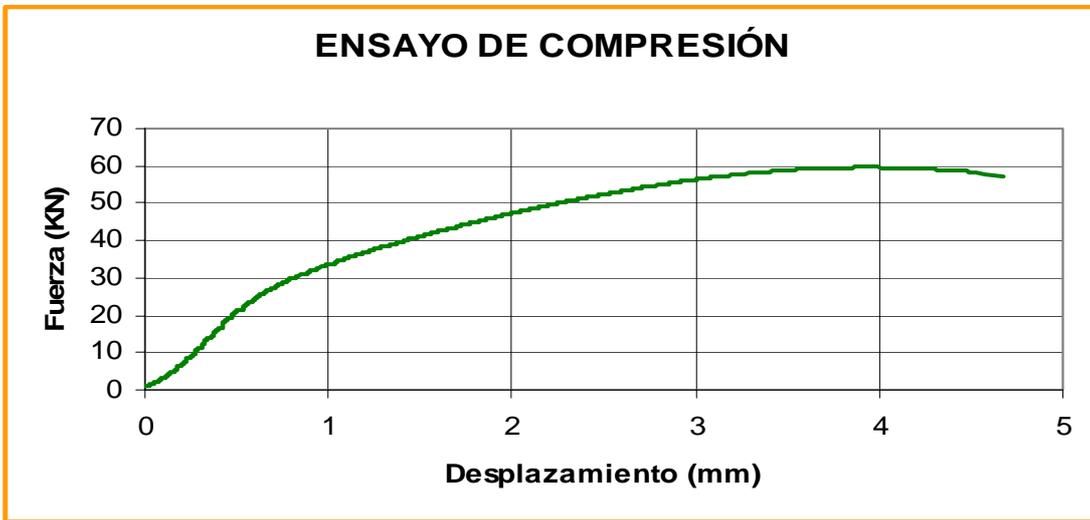
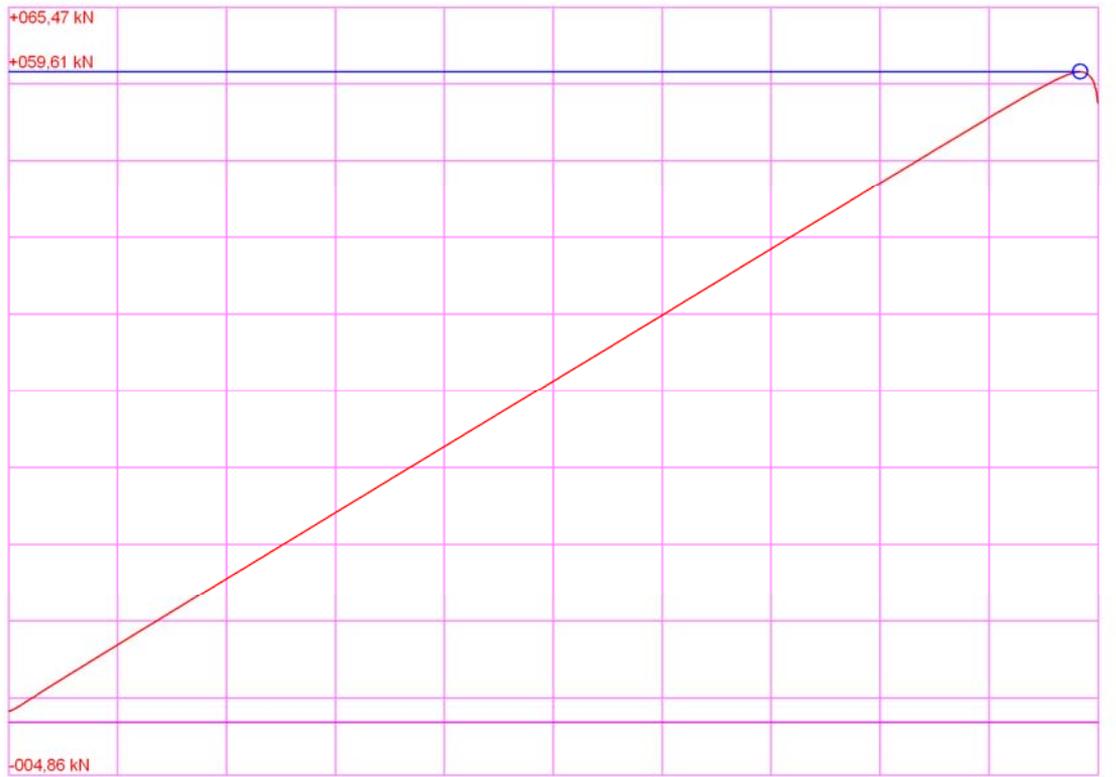


GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA



OBSERVACIONES

### A4.3. ROTURA A COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETAS A LOS 90 DÍAS

ENSAYO DE COMPRESIÓN	
Tipo de probeta	Cilíndrica
Nº de probeta	A1.5
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	27/11/2007
Fecha ensayo	26/02/2008
Edad de la probeta (Días)	90
Altura (mm)	180
Diámetro (mm)	150
Refrentado	Azufre
Peso probeta (Kg)	7,046
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,160
Carga de rotura (kN)	79,4
Tensión de rotura (MPa)	4,493

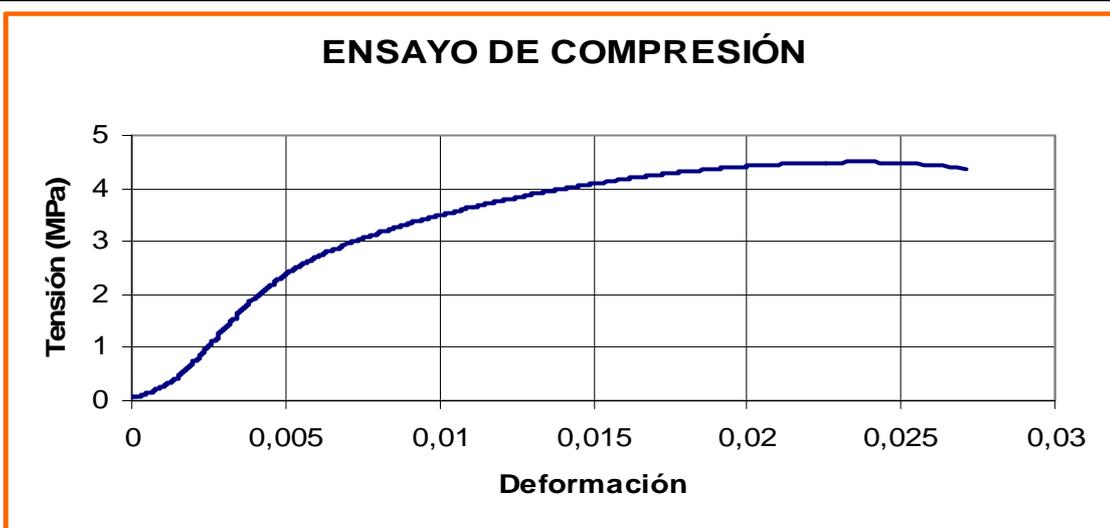
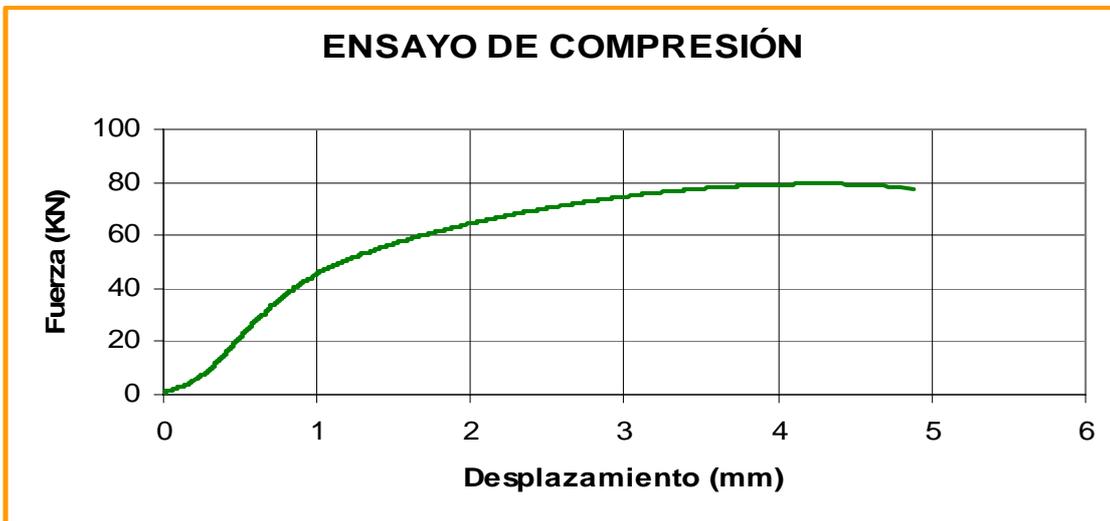
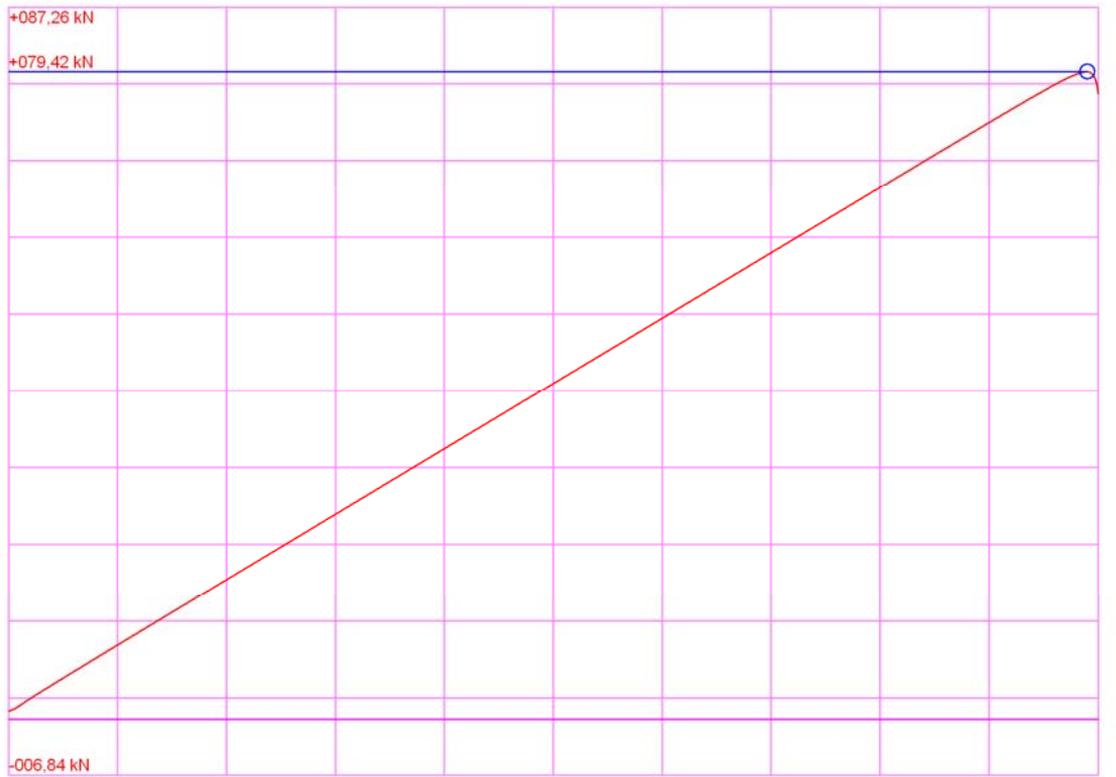


GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA



OBSERVACIONES

ENSAYO DE COMPRESIÓN	
Tipo de probeta	Cilíndrica
Nº de probeta	A1.6
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	27/11/2007
Fecha ensayo	26/02/2008
Edad de la probeta (Días)	90
Altura (mm)	180
Diámetro (mm)	150
Refrentado	Azufre
Peso probeta (Kg)	7,015
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,157
Carga de rotura (kN)	72,2
Tensión de rotura (MPa)	4,085

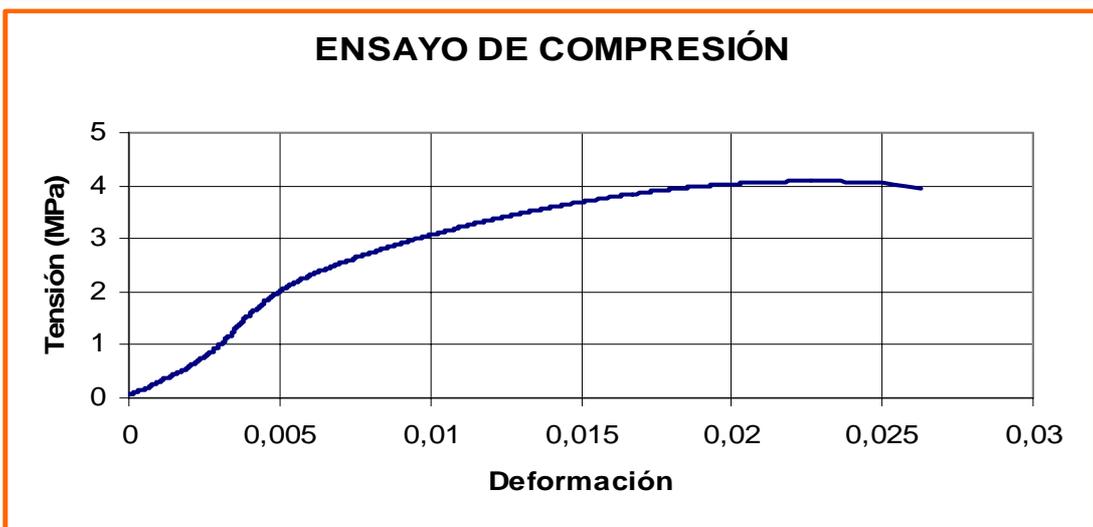
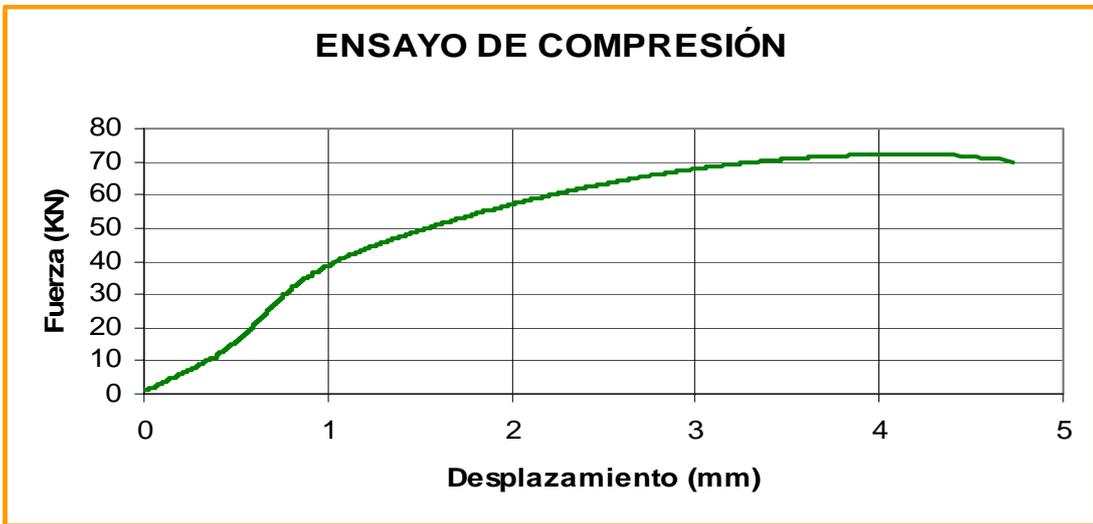
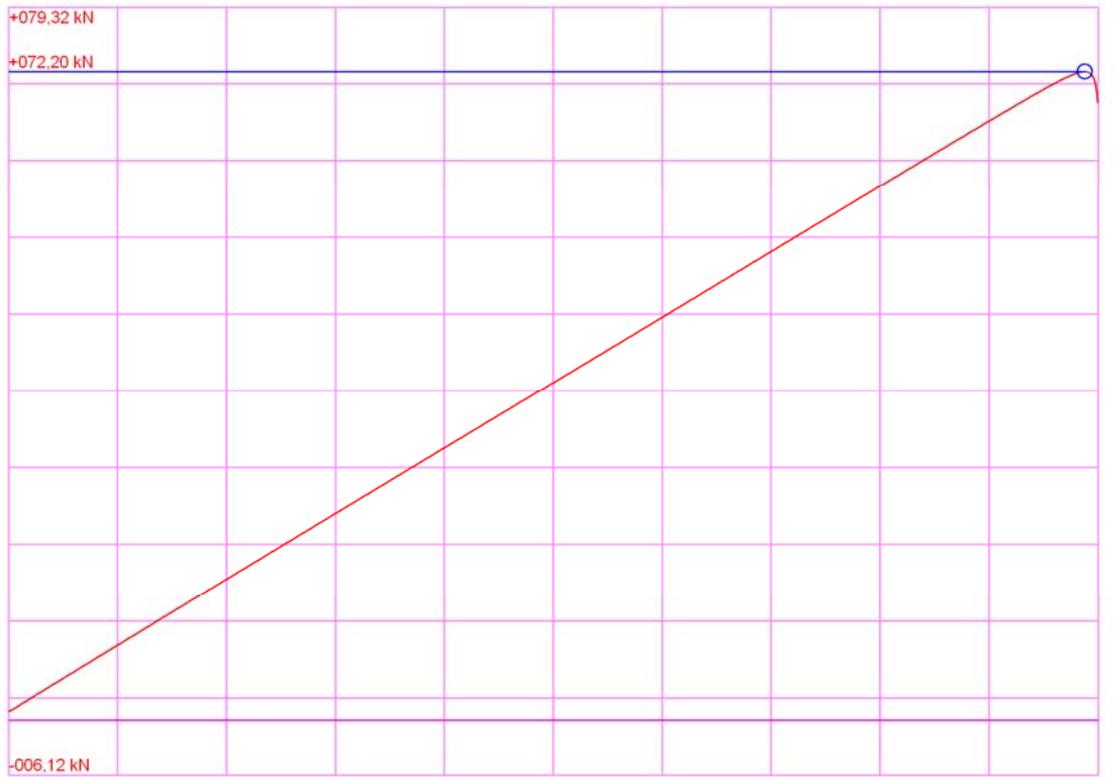


GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA



OBSERVACIONES

ENSAYO DE COMPRESIÓN	
Tipo de probeta	Cilíndrica
Nº de probeta	A1.7
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	27/11/2007
Fecha ensayo	26/02/2008
Edad de la probeta (Días)	90
Altura (mm)	180
Diámetro (mm)	150
Refrentado	Azufre
Peso probeta (Kg)	7,090
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,169
Carga de rotura (kN)	78,78
Tensión de rotura (MPa)	4,458

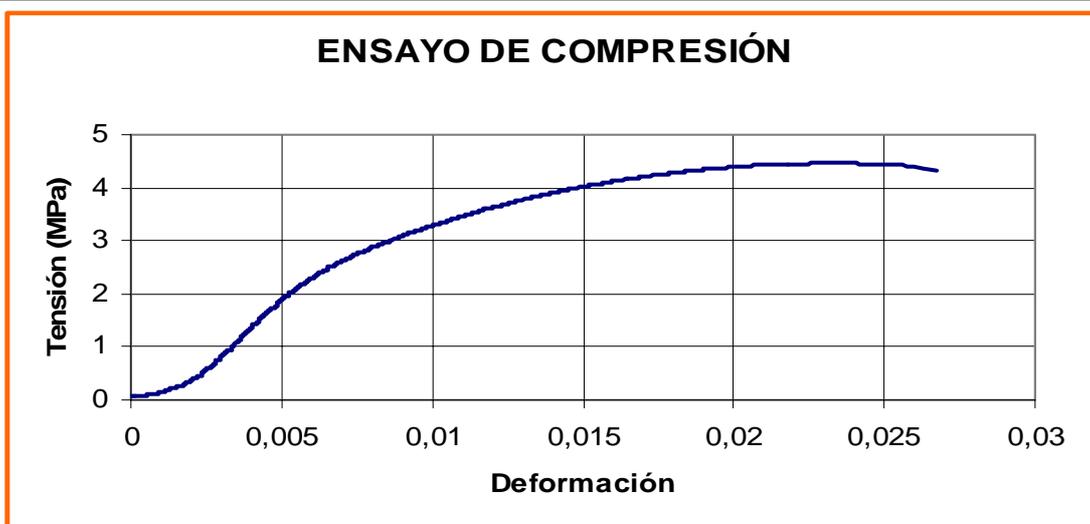
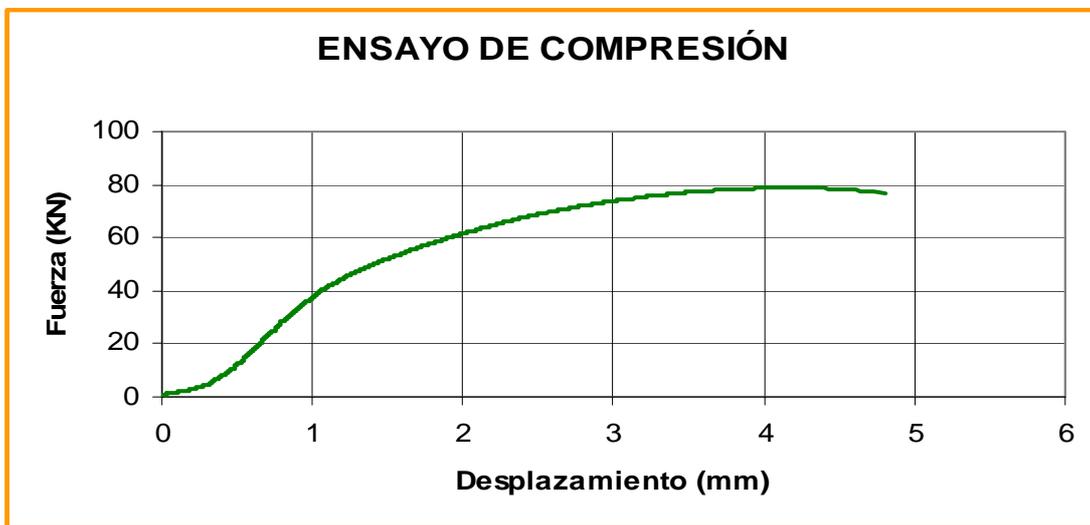
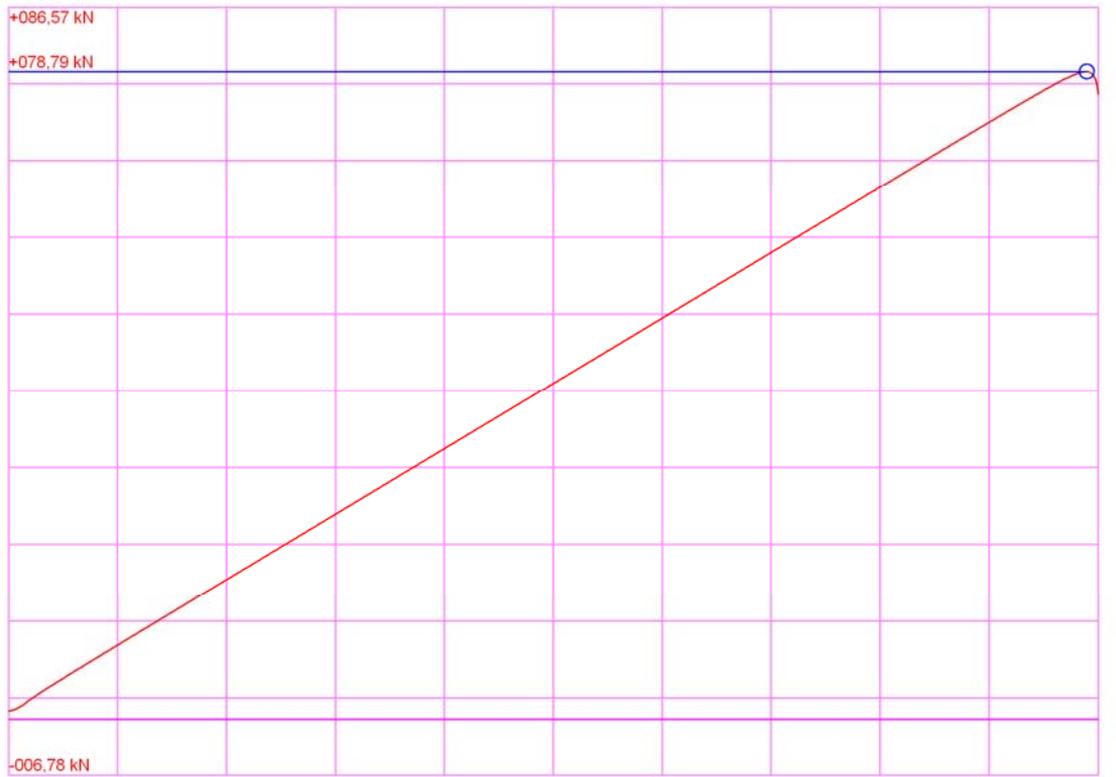


GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA



OBSERVACIONES

ENSAYO DE COMPRESIÓN	
Tipo de probeta	Cilíndrica
Nº de probeta	A2.7
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	28/11/2007
Fecha ensayo	27/02/2008
Edad de la probeta (Días)	90
Altura (mm)	180
Diámetro (mm)	150
Refrentado	Azufre
Peso probeta (Kg)	7,090
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,167
Carga de rotura (kN)	61,35
Tensión de rotura (MPa)	3,472

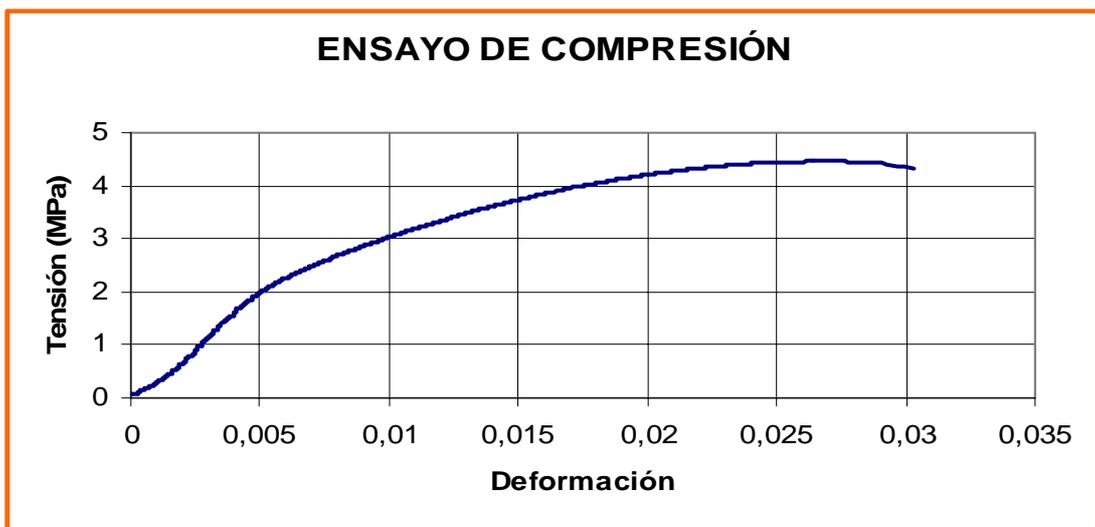
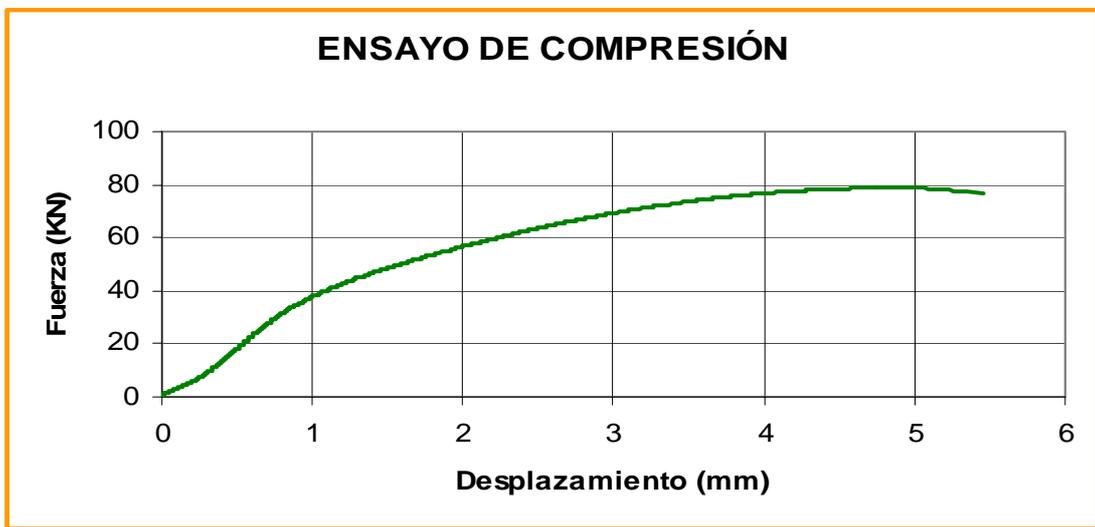
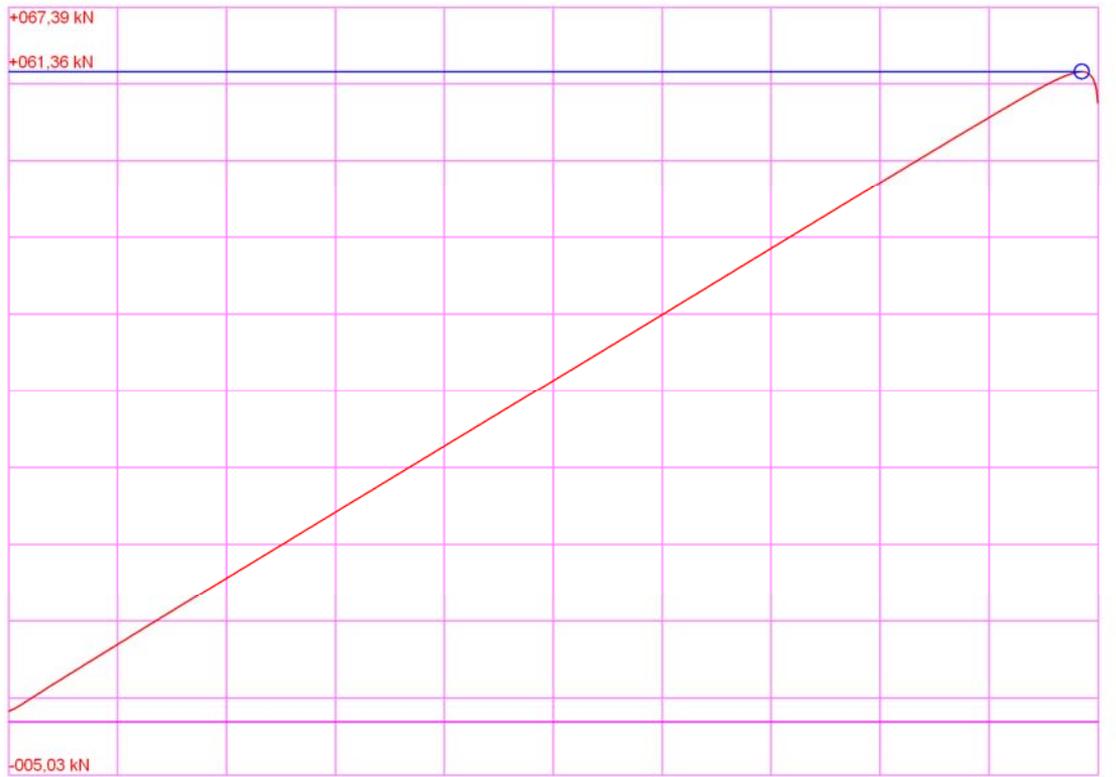


GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA



OBSERVACIONES

ENSAYO DE COMPRESIÓN	
Tipo de probeta	Cilíndrica
Nº de probeta	A2.8
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	28/11/2007
Fecha ensayo	27/02/2008
Edad de la probeta (Días)	90
Altura (mm)	180
Diámetro (mm)	150
Refrentado	Azufre
Peso probeta (Kg)	6,967
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,124
Carga de rotura (kN)	65,67
Tensión de rotura (MPa)	3,716

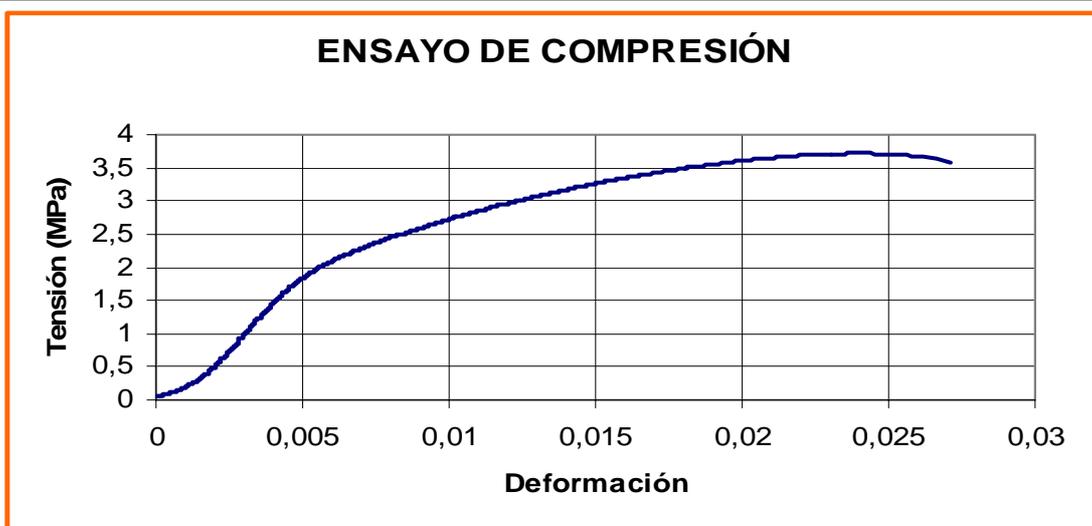
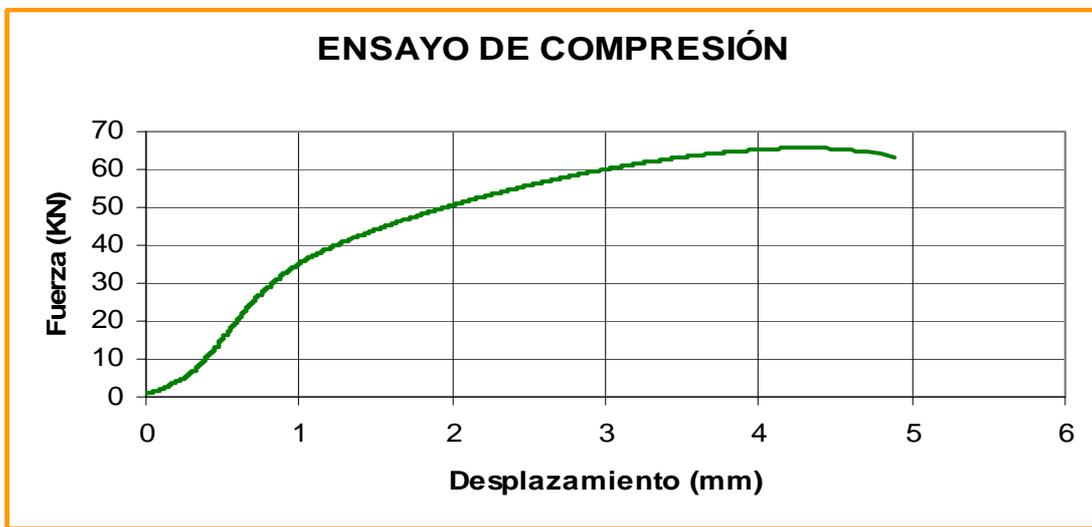
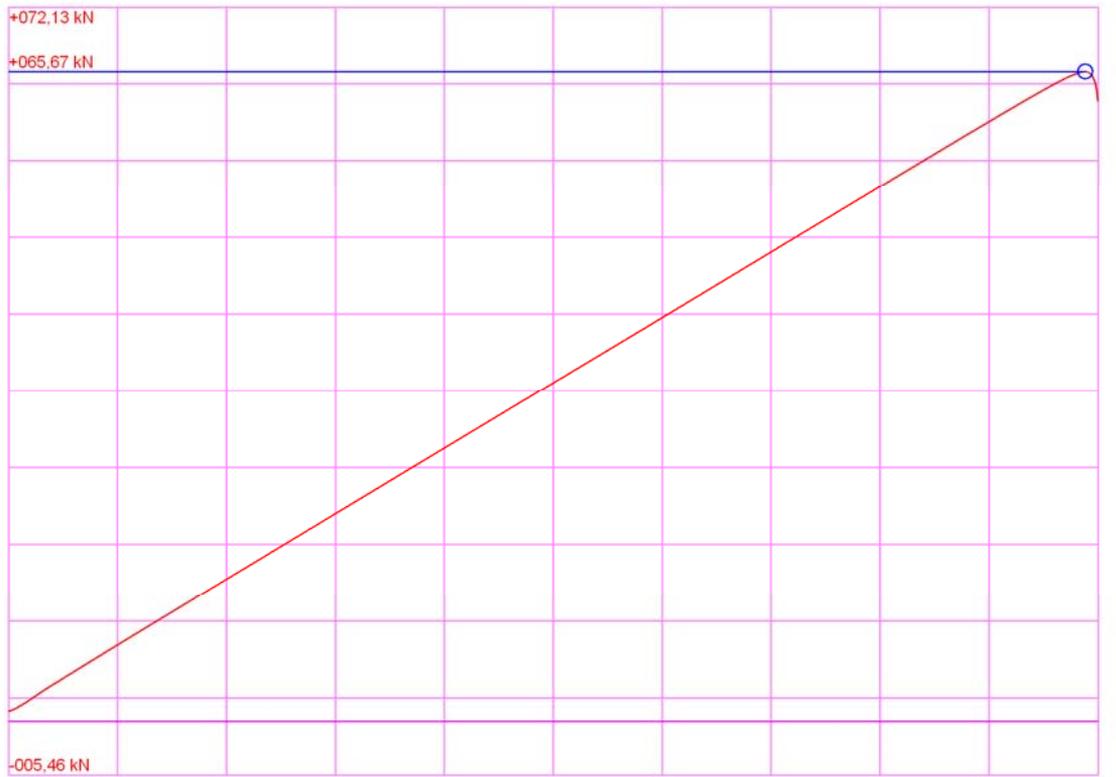


GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA



OBSERVACIONES

ENSAYO DE COMPRESIÓN	
Tipo de probeta	Cilíndrica
Nº de probeta	A3.4
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	29/11/2007
Fecha ensayo	28/02/2008
Edad de la probeta (Días)	90
Altura (mm)	180
Diámetro (mm)	150
Refrentado	Azufre
Peso probeta (Kg)	6,875
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,123
Carga de rotura (kN)	64,28
Tensión de rotura (MPa)	3,638

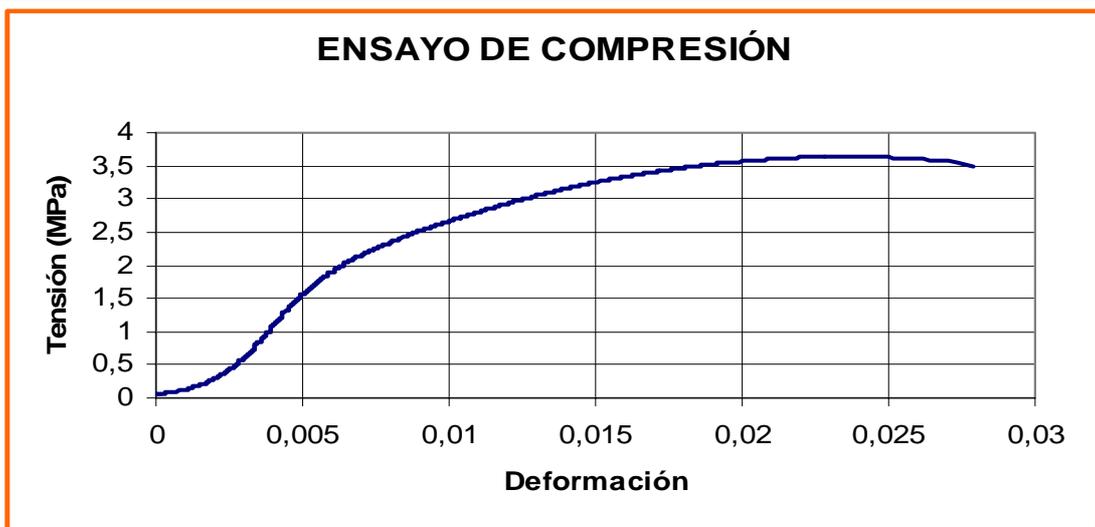
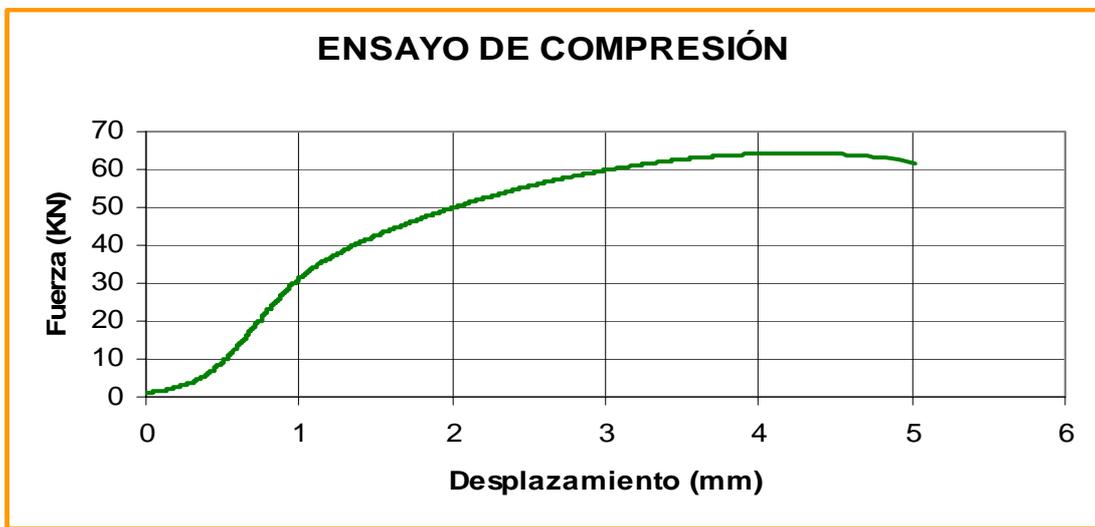
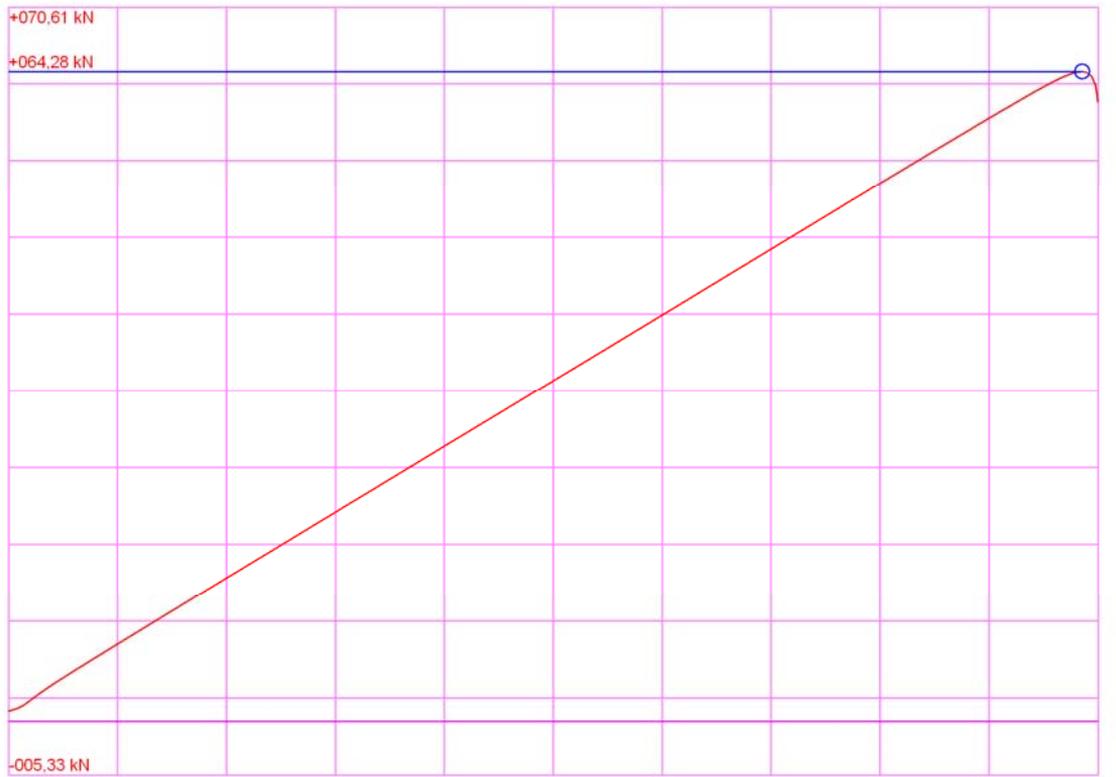


GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA



OBSERVACIONES

ENSAYO DE COMPRESIÓN	
Tipo de probeta	Cilíndrica
Nº de probeta	A3.5
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	29/11/2007
Fecha ensayo	28/02/2008
Edad de la probeta (Días)	90
Altura (mm)	180
Diámetro (mm)	150
Refrentado	Azufre
Peso probeta (Kg)	6,909
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,122
Carga de rotura (kN)	70,14
Tensión de rotura (MPa)	3,970

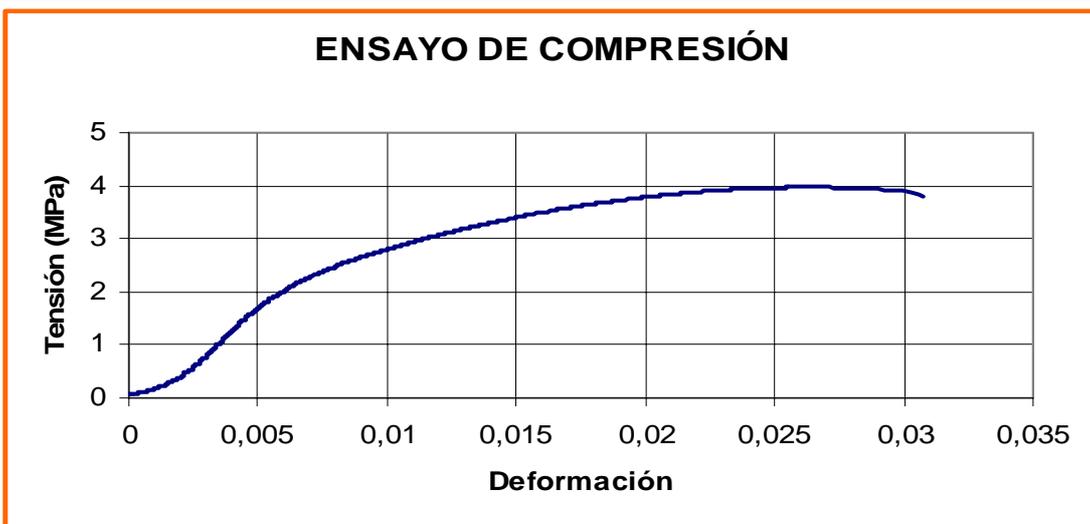
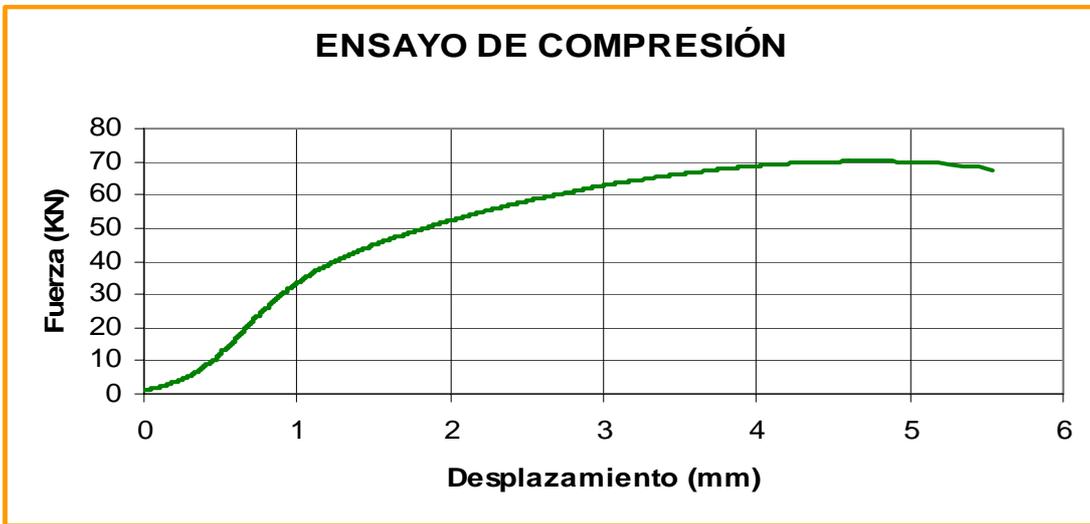
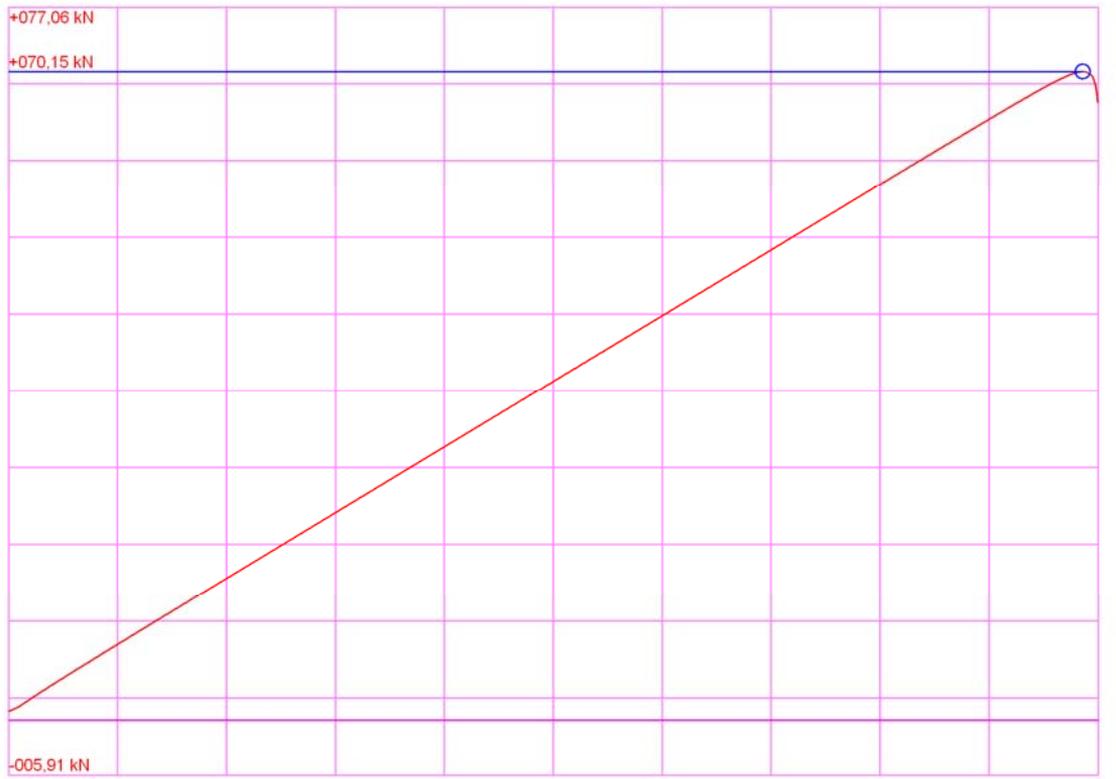


GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA



OBSERVACIONES

ENSAYO DE COMPRESIÓN	
Tipo de probeta	Cilíndrica
Nº de probeta	A3.6
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	29/11/2007
Fecha ensayo	28/02/2008
Edad de la probeta (Días)	90
Altura (mm)	180
Diámetro (mm)	150
Refrentado	Azufre
Peso probeta (Kg)	6,897
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,119
Carga de rotura (kN)	68,05
Tensión de rotura (MPa)	3,851

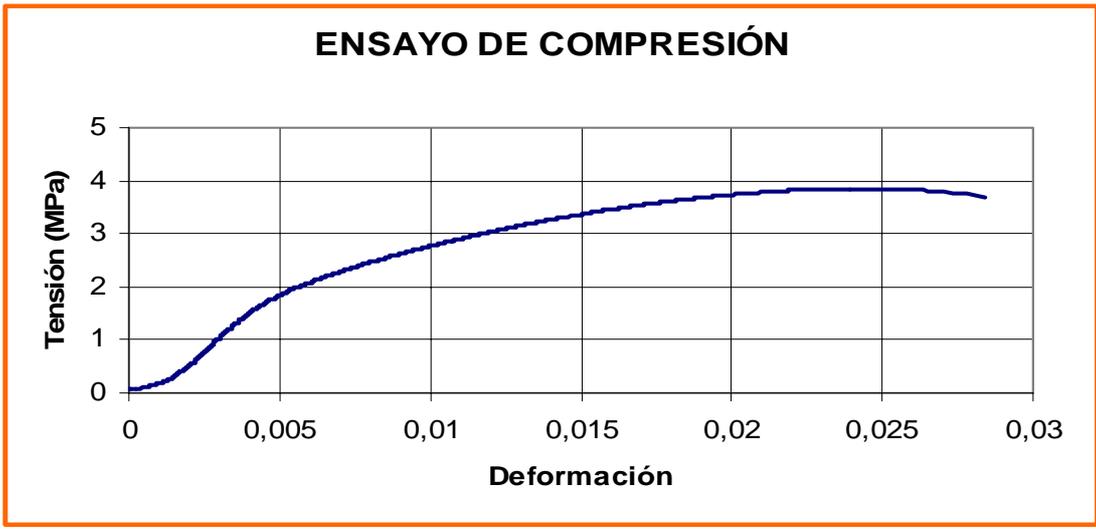
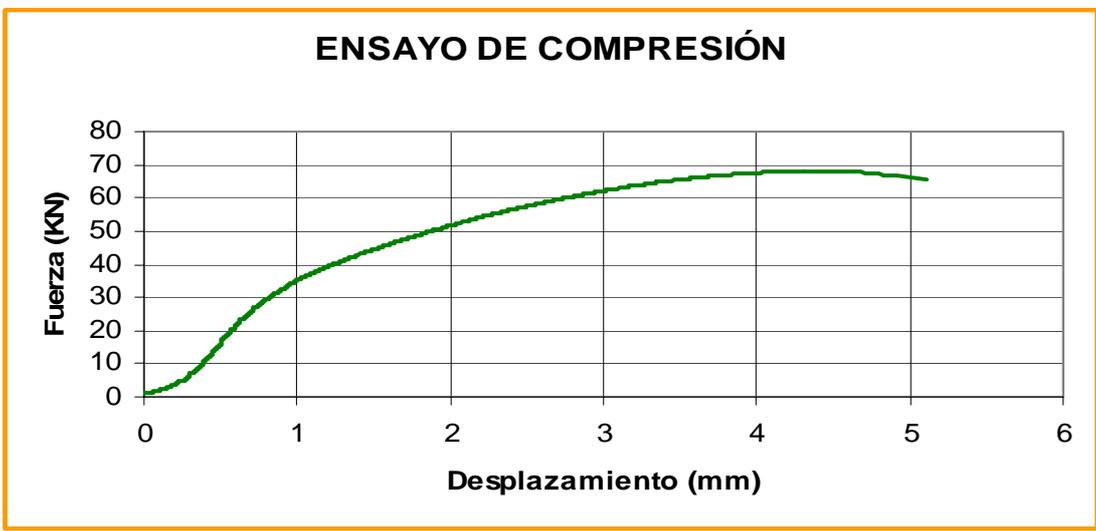
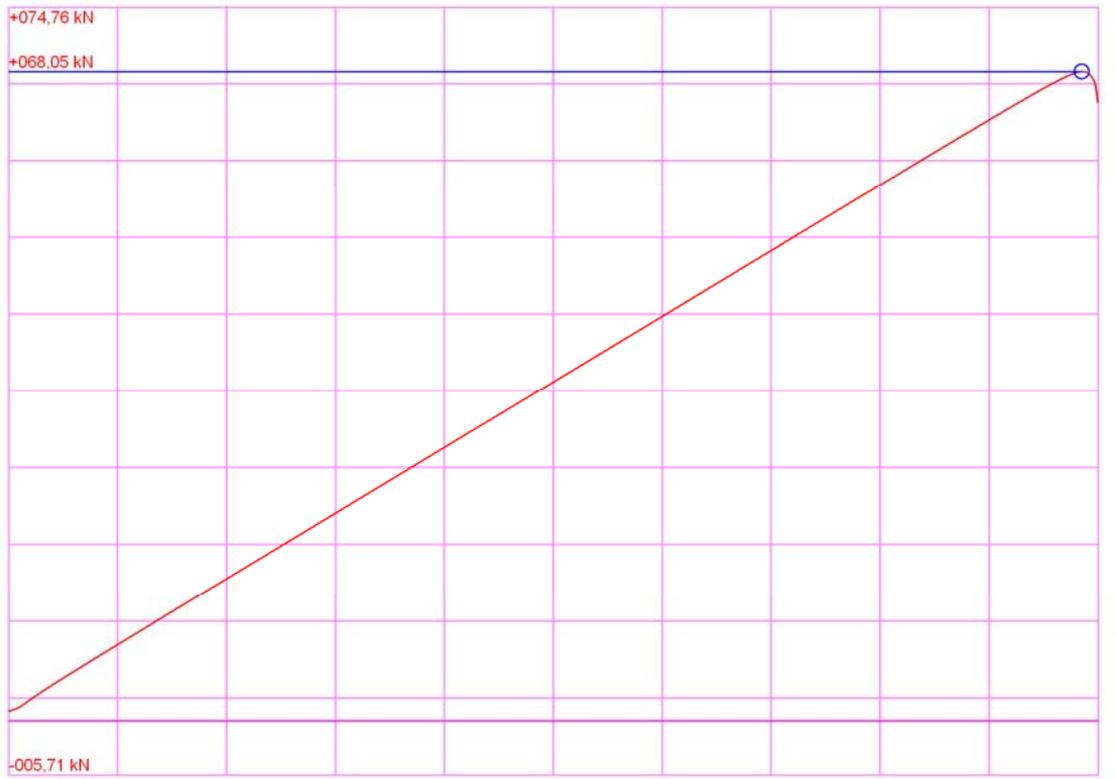


GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA



OBSERVACIONES

### A4.4. ROTURA A TRACCIÓN INDIRECTA DE PROBETAS A LOS 7 DÍAS

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	
Tipo de probeta	Cilíndrica
Nº de probeta	A1.4
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	27/11/2007
Fecha ensayo	04/12/2007
Edad de la probeta (Días)	7
Altura (mm)	180
Diámetro (mm)	150
Refrentado	Azufre
Peso probeta (Kg)	7,334
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,166
Carga de rotura (kN)	9,42
Tensión de rotura (MPa)	0,22

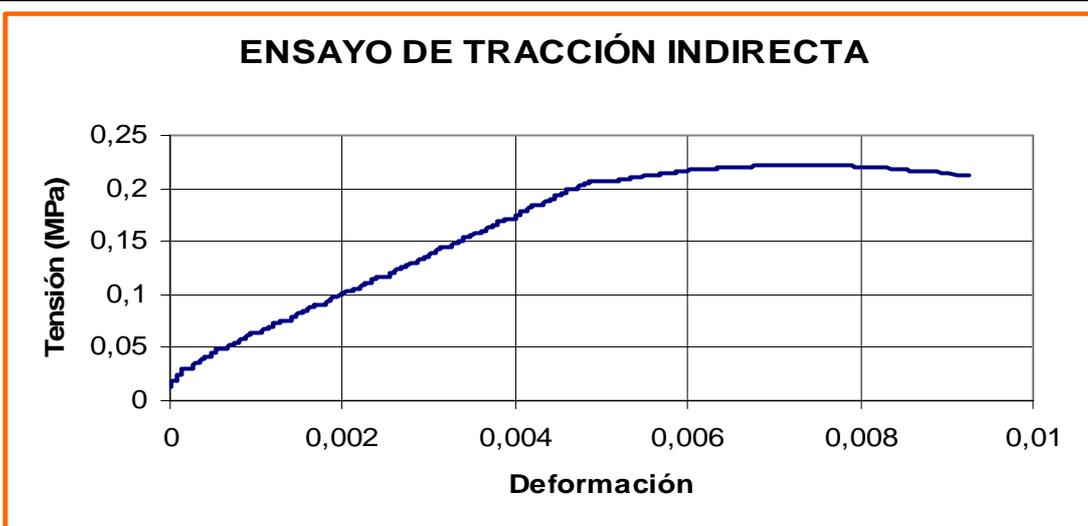
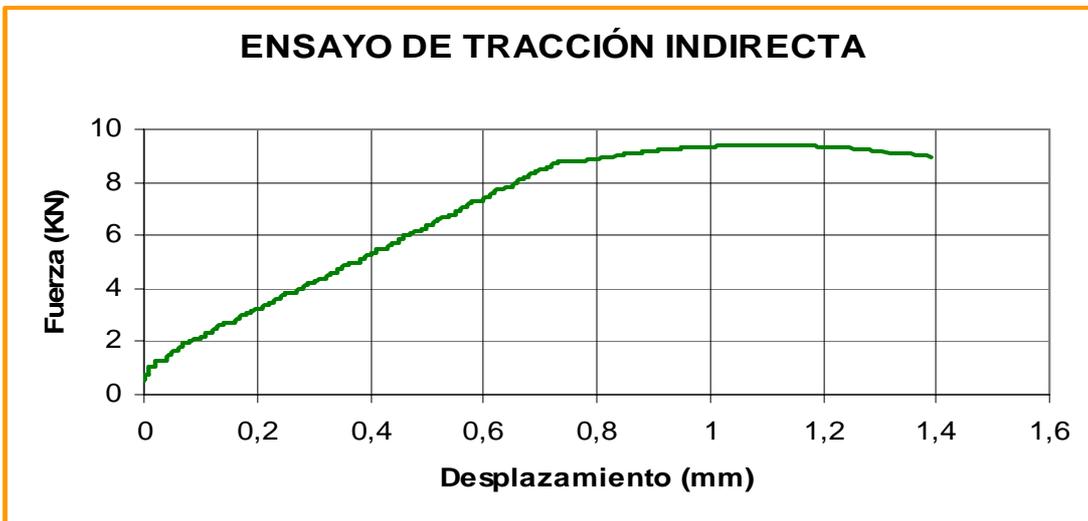
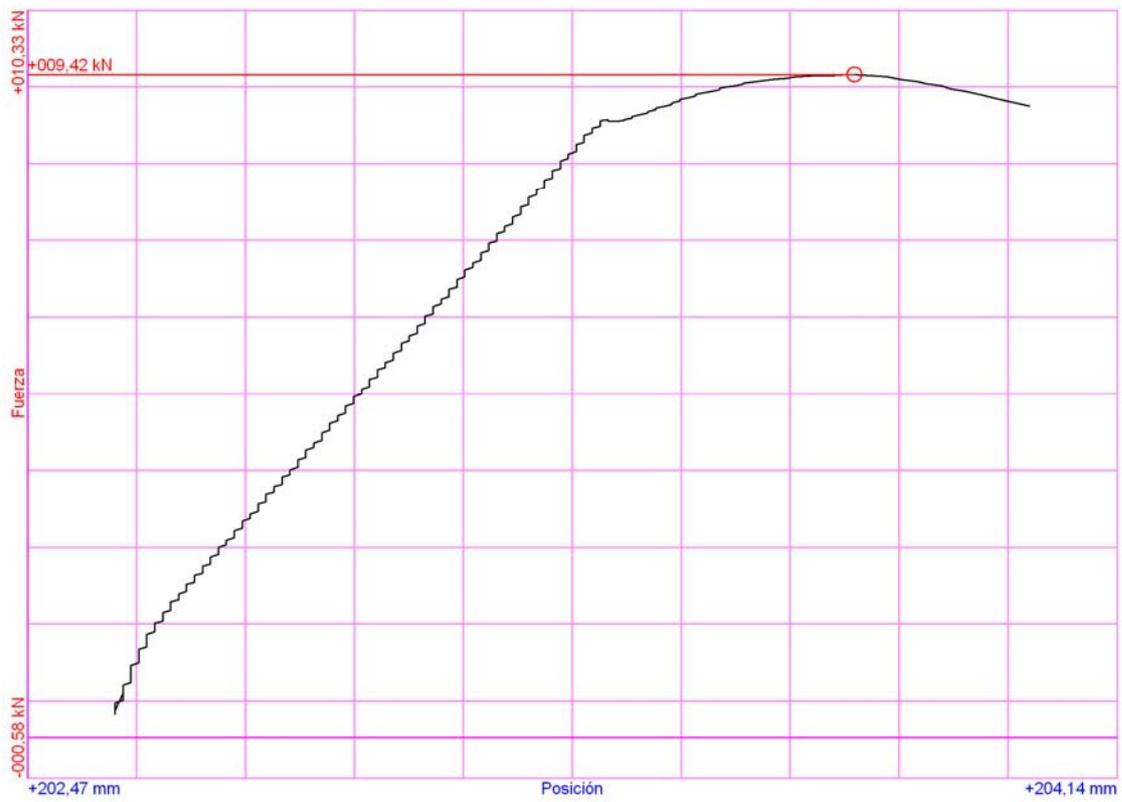


GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA



OBSERVACIONES

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	
Tipo de probeta	Cilíndrica
Nº de probeta	A2.4
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	28/11/2007
Fecha ensayo	05/12/2007
Edad de la probeta (Días)	7
Altura (mm)	180
Diámetro (mm)	150
Refrentado	Azufre
Peso probeta (Kg)	7,338
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,171
Carga de rotura (kN)	6,86
Tensión de rotura (MPa)	0,16

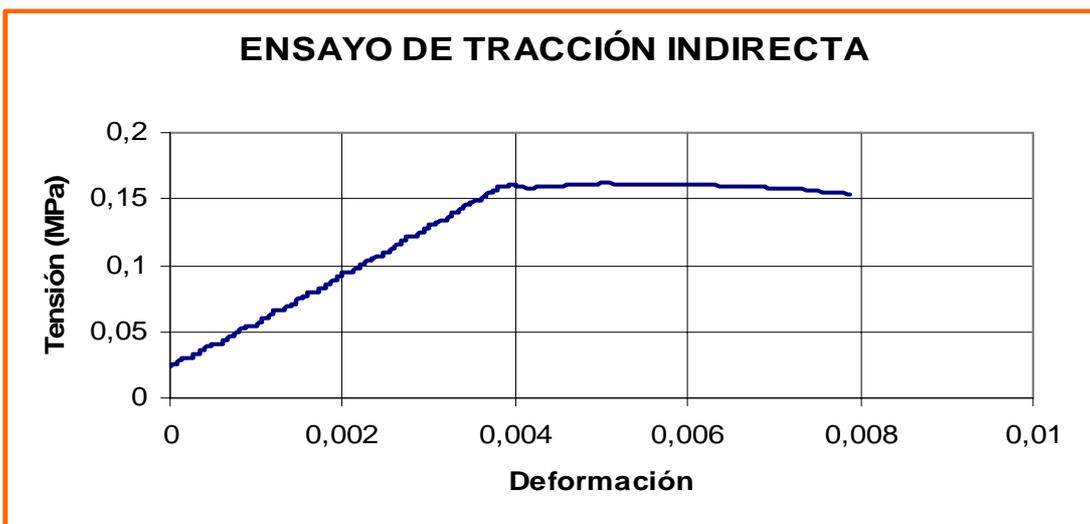
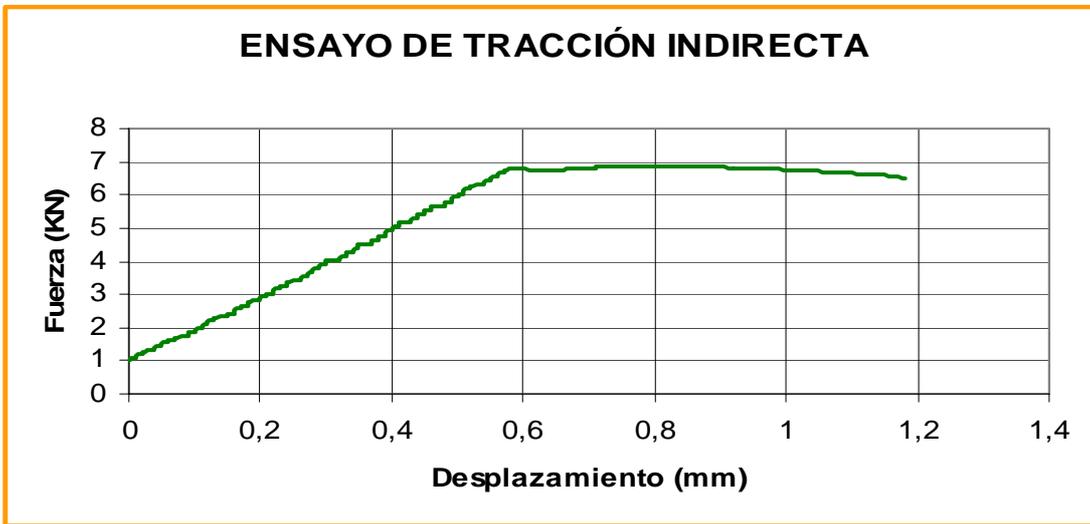
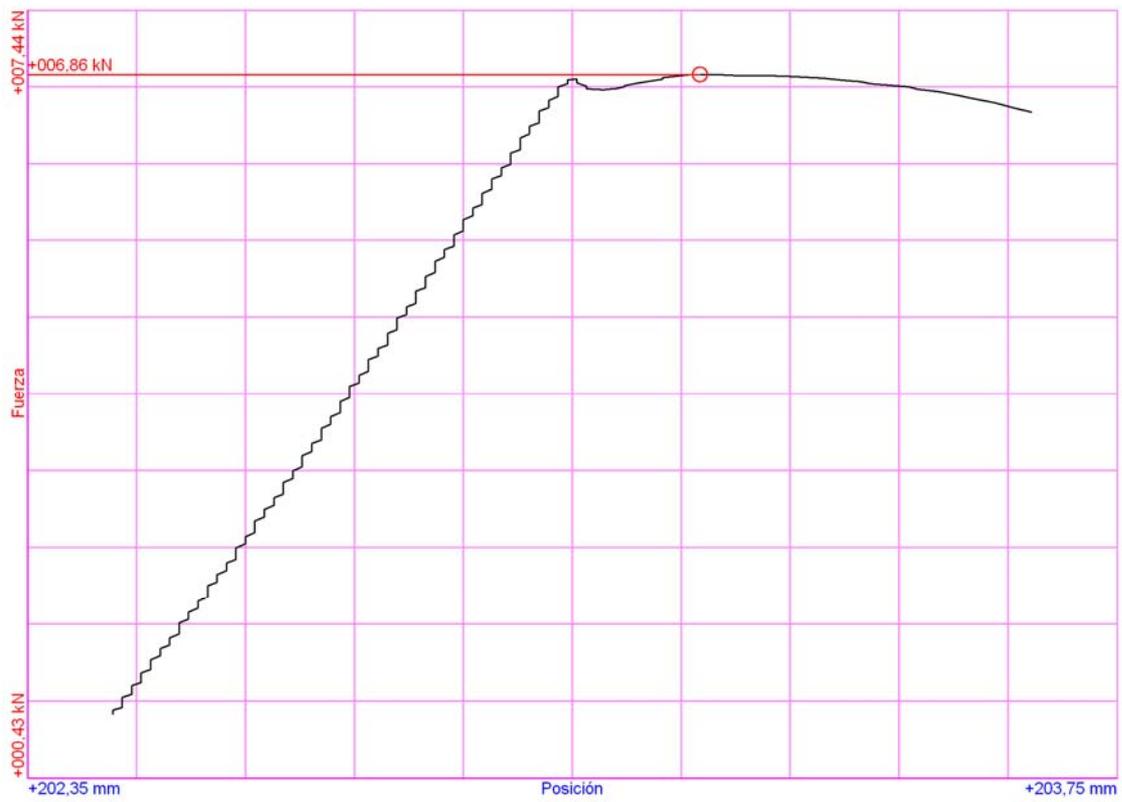


GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA



OBSERVACIONES

--

### A4.5. ROTURA A TRACCIÓN INDIRECTA DE PROBETAS A LOS 28 DÍAS

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	
Tipo de probeta	Cilíndrica
Nº de probeta	A2.6
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	28/11/2007
Fecha ensayo	26/12/2007
Edad de la probeta (Días)	28
Altura (mm)	180
Diámetro (mm)	150
Refrentado	Azufre
Peso probeta (Kg)	7,145
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,147
Carga de rotura (kN)	9,36
Tensión de rotura (MPa)	0,221

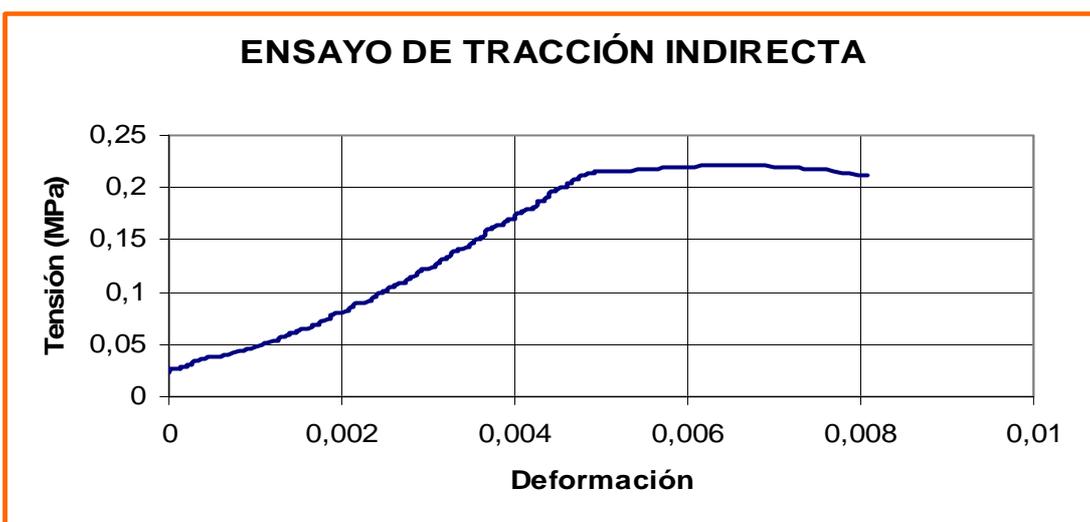
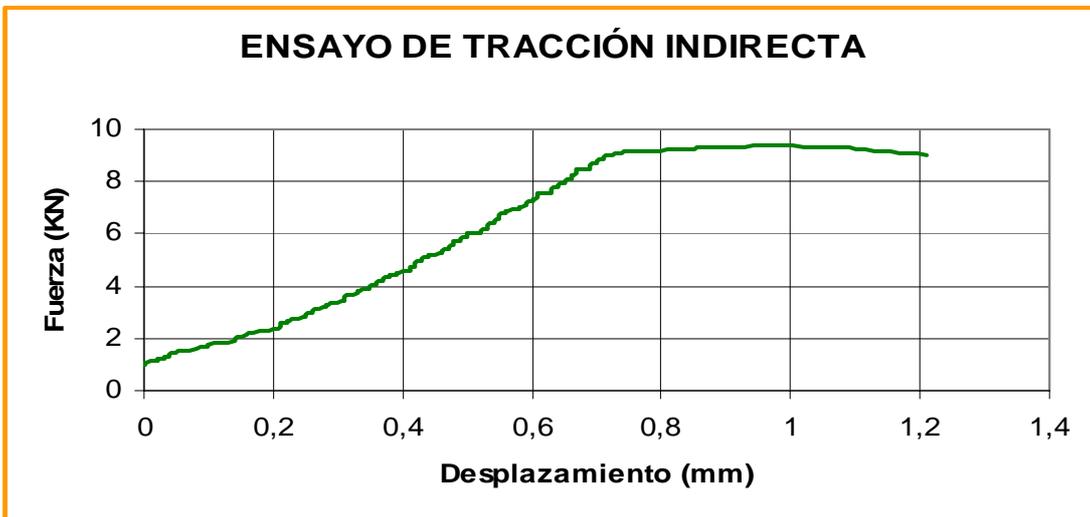
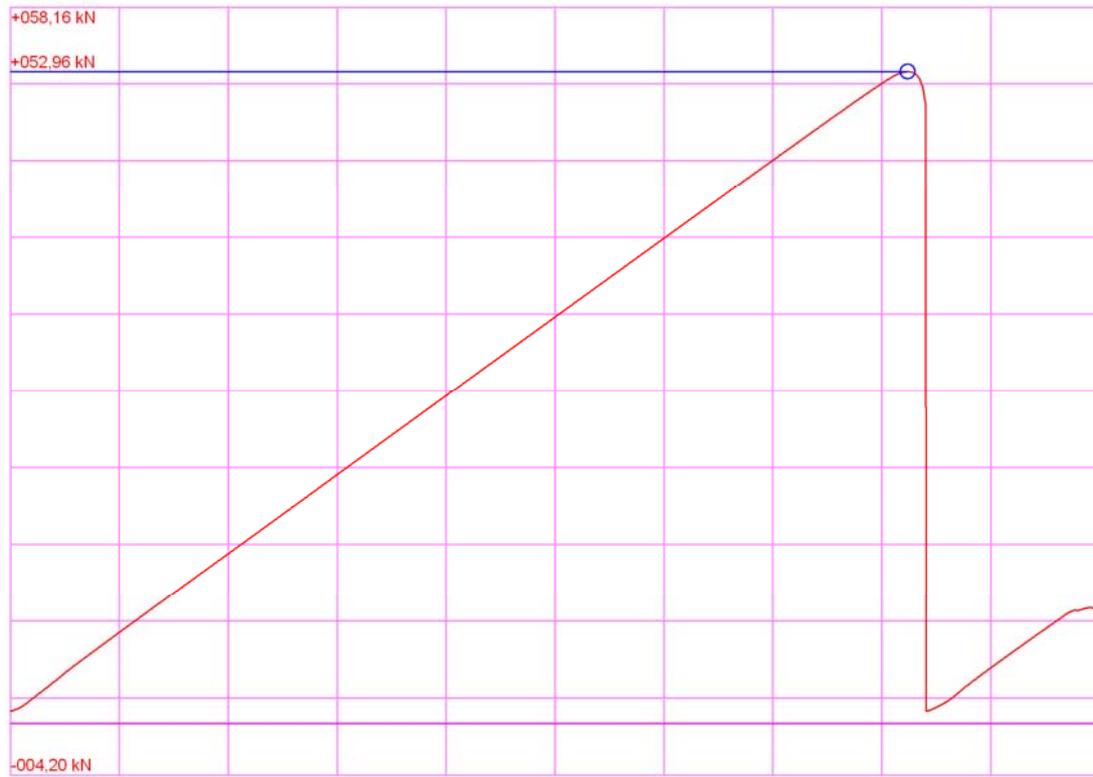


GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA



#### OBSERVACIONES

En la gráfica que proporciona el programa el segundo pico es el que corresponde al ensayo.

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	
Tipo de probeta	Cilíndrica
Nº de probeta	A3.3
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	29/11/2007
Fecha ensayo	27/12/2007
Edad de la probeta (Días)	28
Altura (mm)	180
Diámetro (mm)	150
Refrentado	Azufre
Peso probeta (Kg)	6,995
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,108
Carga de rotura (kN)	12,57
Tensión de rotura (MPa)	0,296

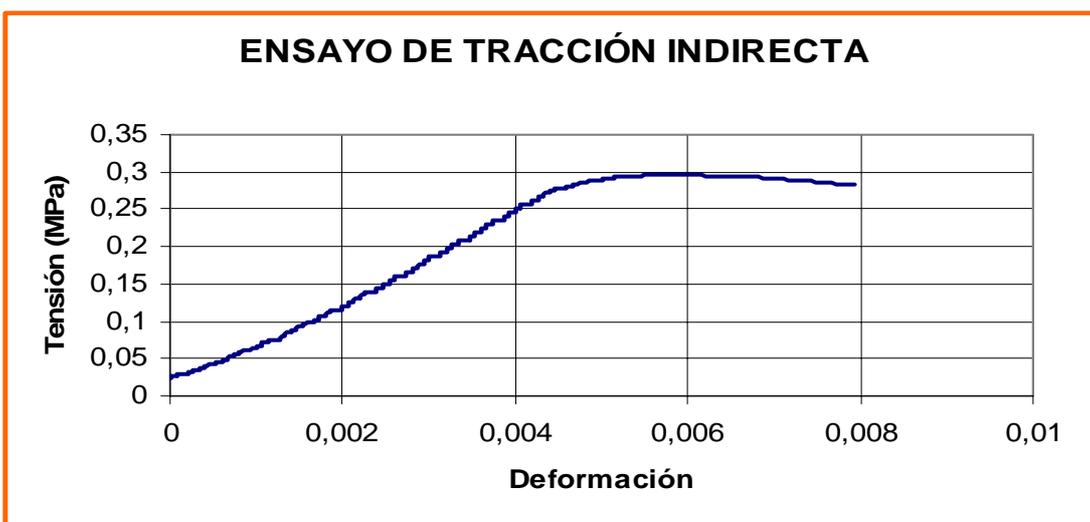
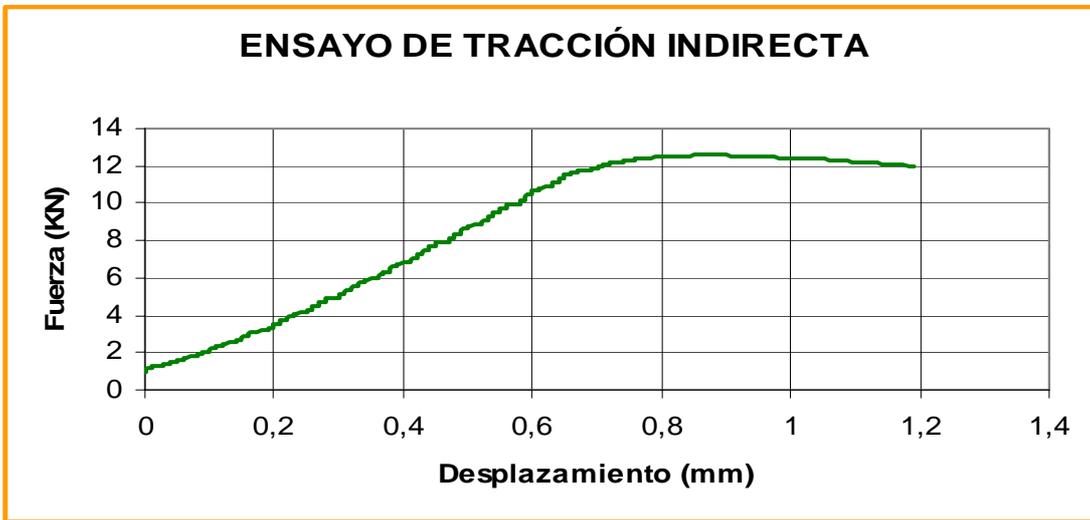
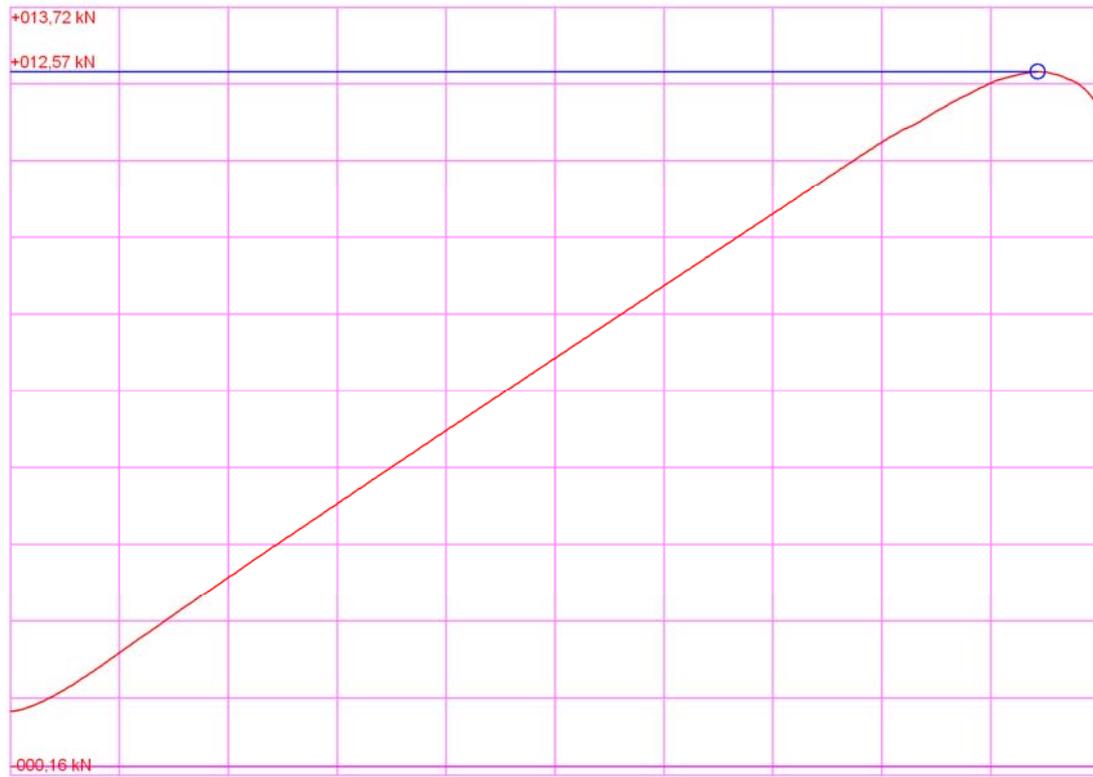


GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA



OBSERVACIONES

--

#### A4.6. ROTURA A TRACCIÓN INDIRECTA DE PROBETAS A LOS 90 DÍAS

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	
Tipo de probeta	Cilíndrica
Nº de probeta	A1.8
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	27/11/2007
Fecha ensayo	26/12/2007
Edad de la probeta (Días)	90
Altura (mm)	180
Diámetro (mm)	150
Refrentado	Azufre
Peso probeta (Kg)	6,936
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,101
Carga de rotura (kN)	19,470
Tensión de rotura (MPa)	0,459

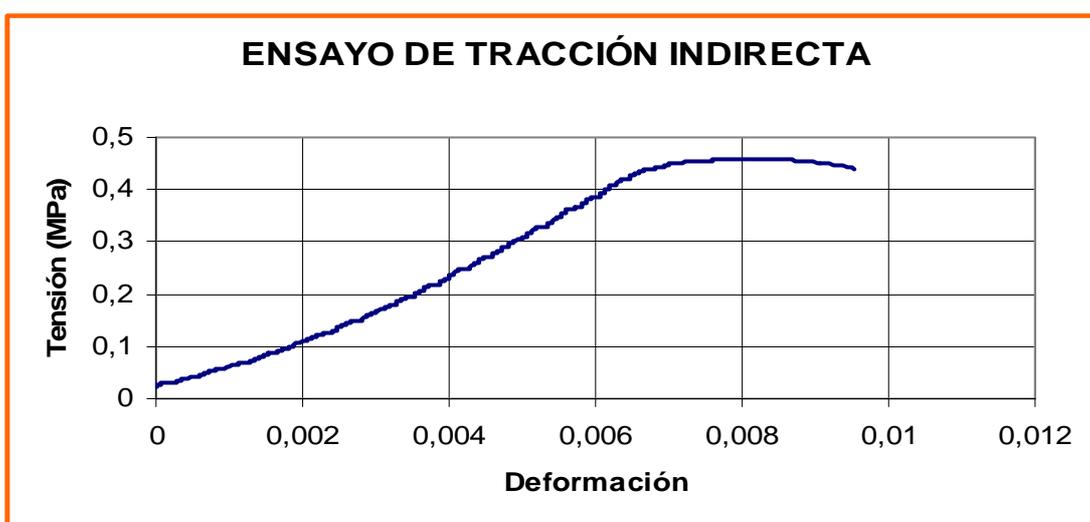
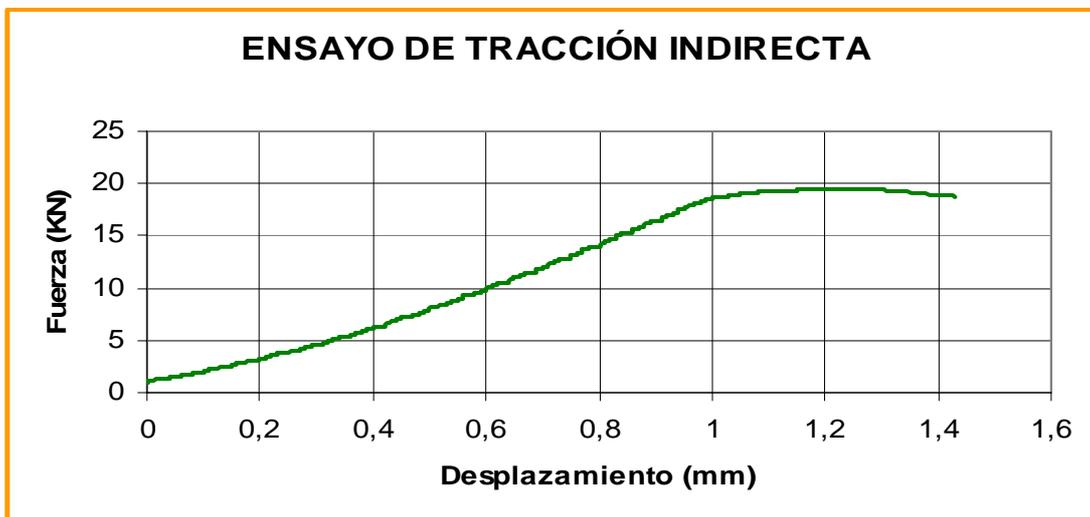
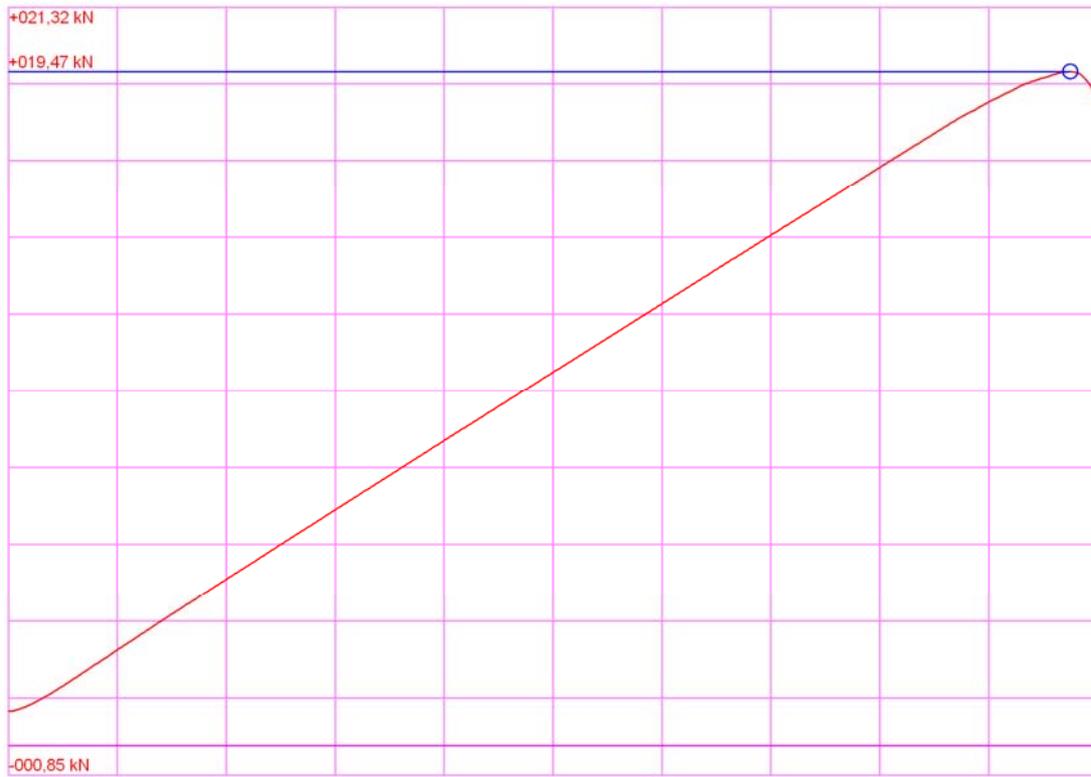


GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA



OBSERVACIONES

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	
Tipo de probeta	Cilíndrica
Nº de probeta	A1.9
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	27/11/2007
Fecha ensayo	26/12/2007
Edad de la probeta (Días)	90
Altura (mm)	180
Diámetro (mm)	150
Refrentado	Azufre
Peso probeta (Kg)	7,106
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,157
Carga de rotura (kN)	19,1
Tensión de rotura (MPa)	0,450

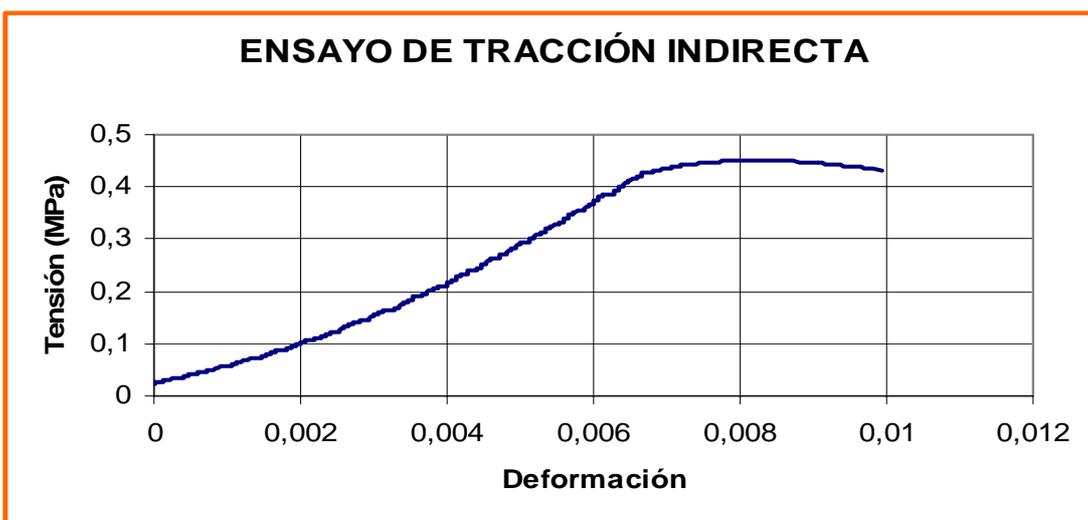
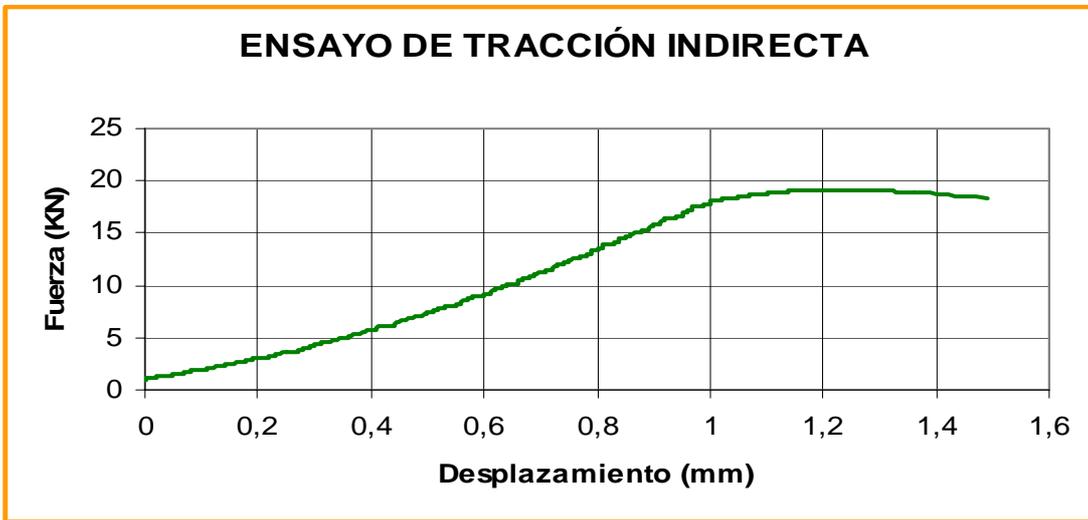
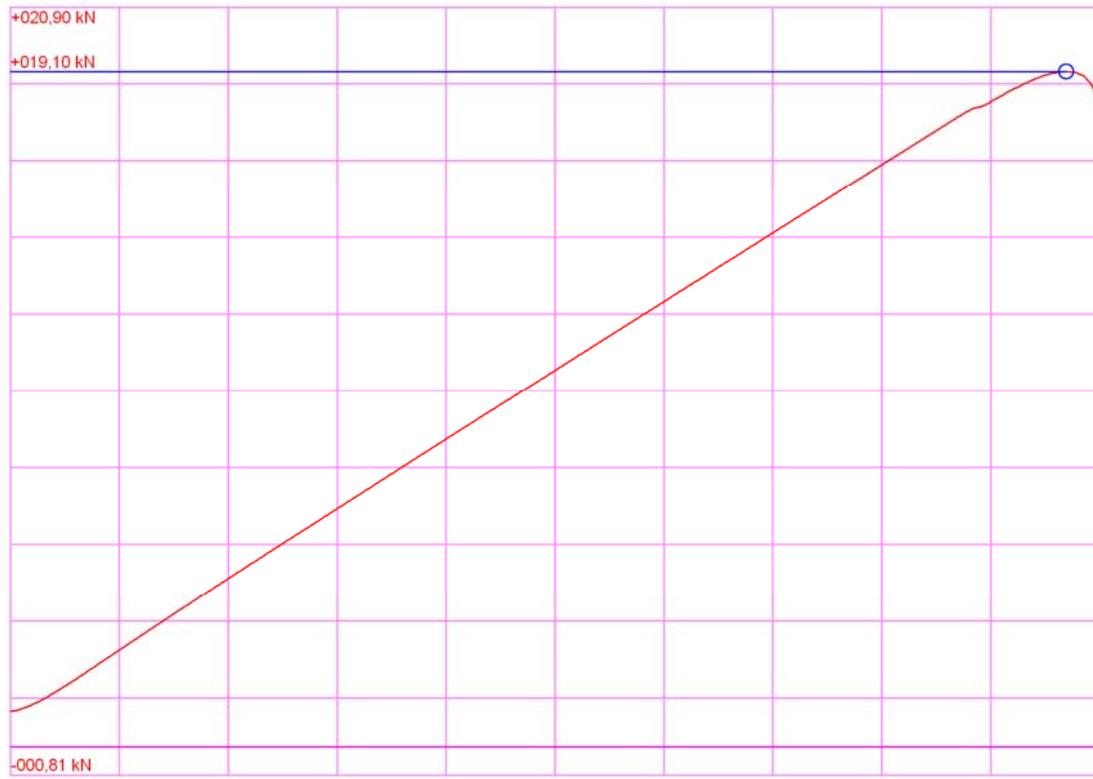


GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA



OBSERVACIONES

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	
Tipo de probeta	Cilíndrica
Nº de probeta	A2.9
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	28/11/2007
Fecha ensayo	27/12/2007
Edad de la probeta (Días)	90
Altura (mm)	180
Diámetro (mm)	150
Refrentado	Azufre
Peso probeta (Kg)	6,847
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,090
Carga de rotura (kN)	13,690
Tensión de rotura (MPa)	0,323

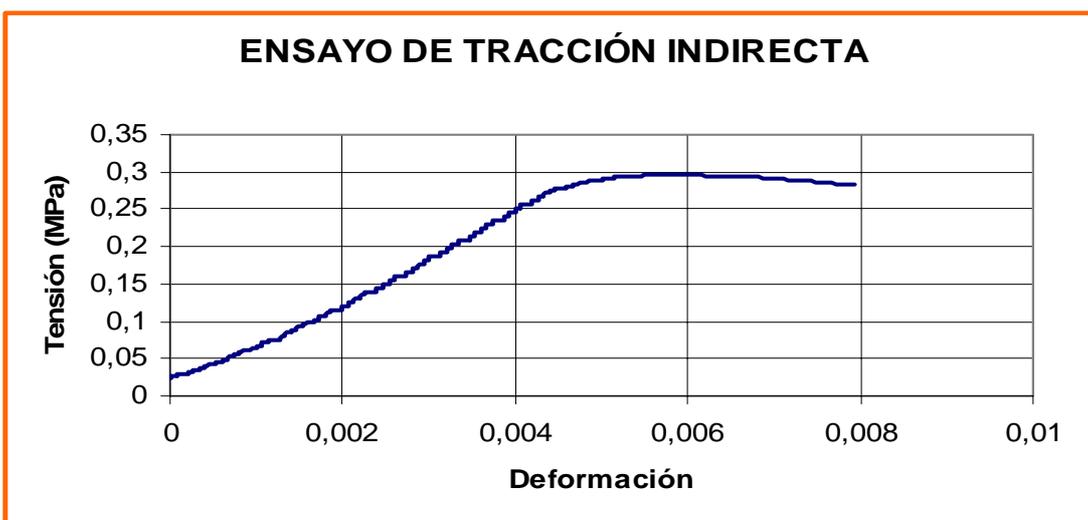
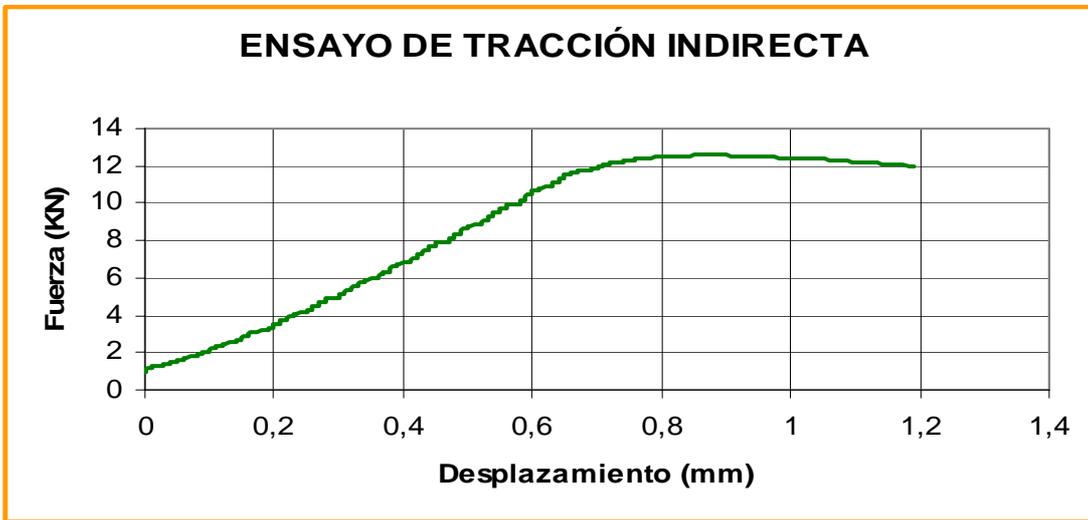
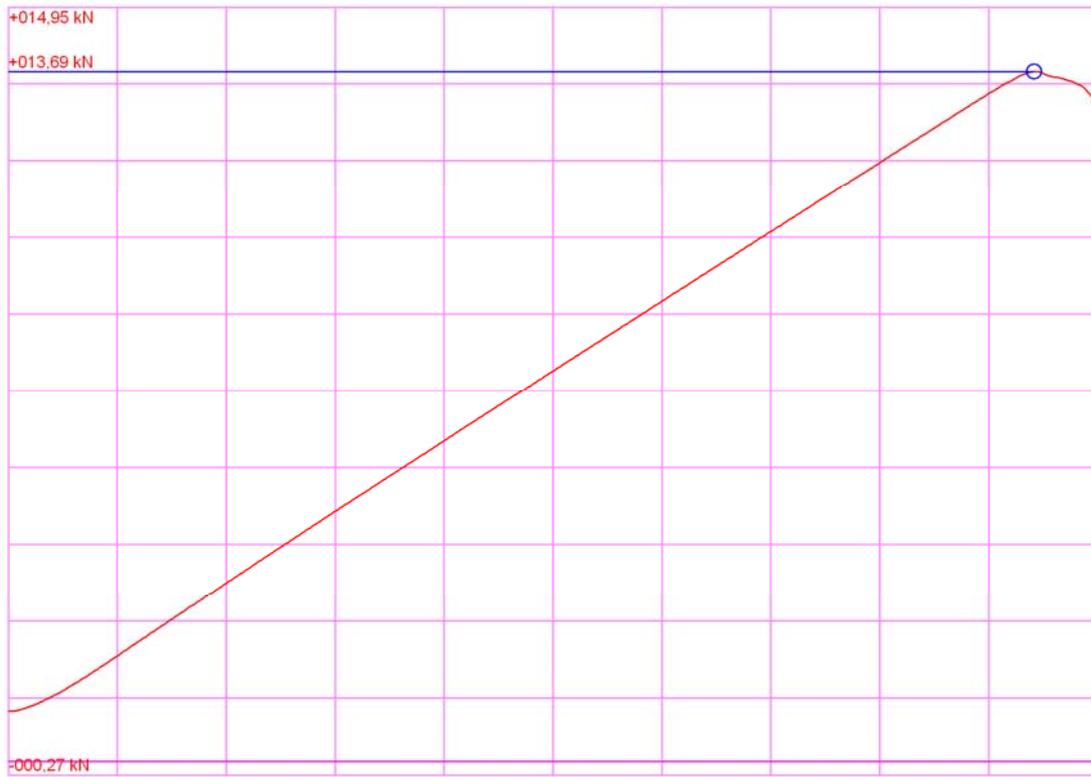


GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA



OBSERVACIONES

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	
Tipo de probeta	Cilíndrica
Nº de probeta	A3.7
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	29/11/2007
Fecha ensayo	28/12/2007
Edad de la probeta (Días)	90
Altura (mm)	180
Diámetro (mm)	150
Refrentado	Azufre
Peso probeta (Kg)	6,975
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,128
Carga de rotura (kN)	15,49
Tensión de rotura (MPa)	0,365

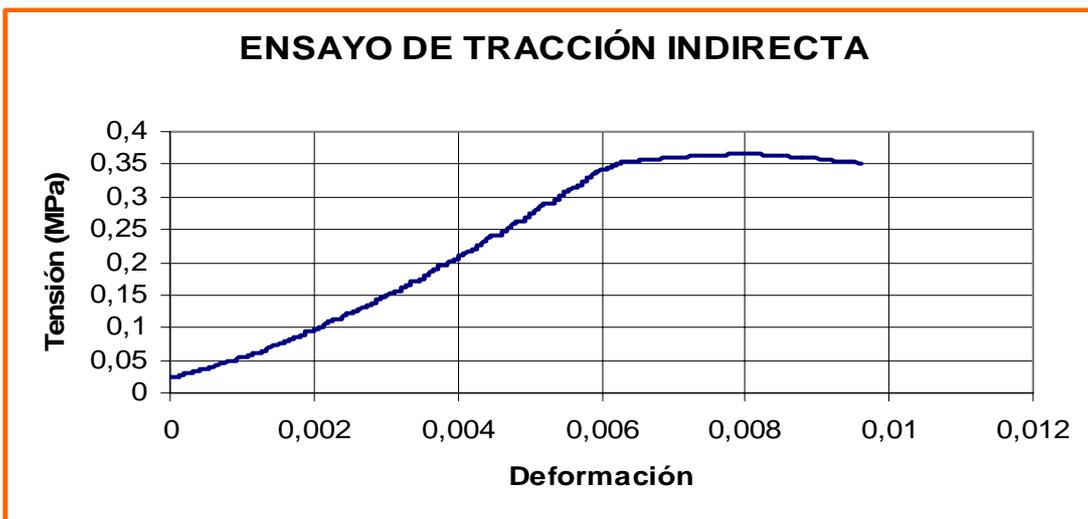
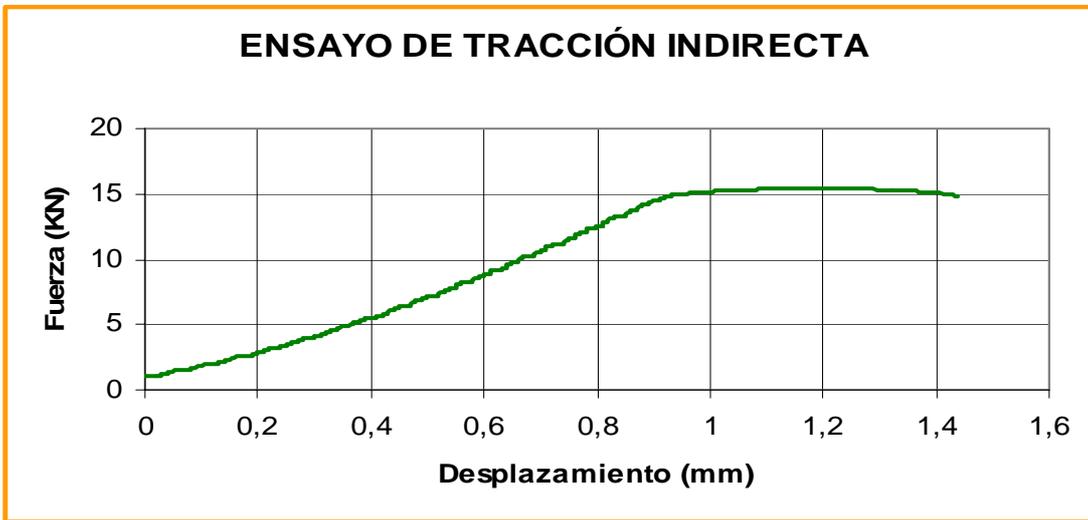
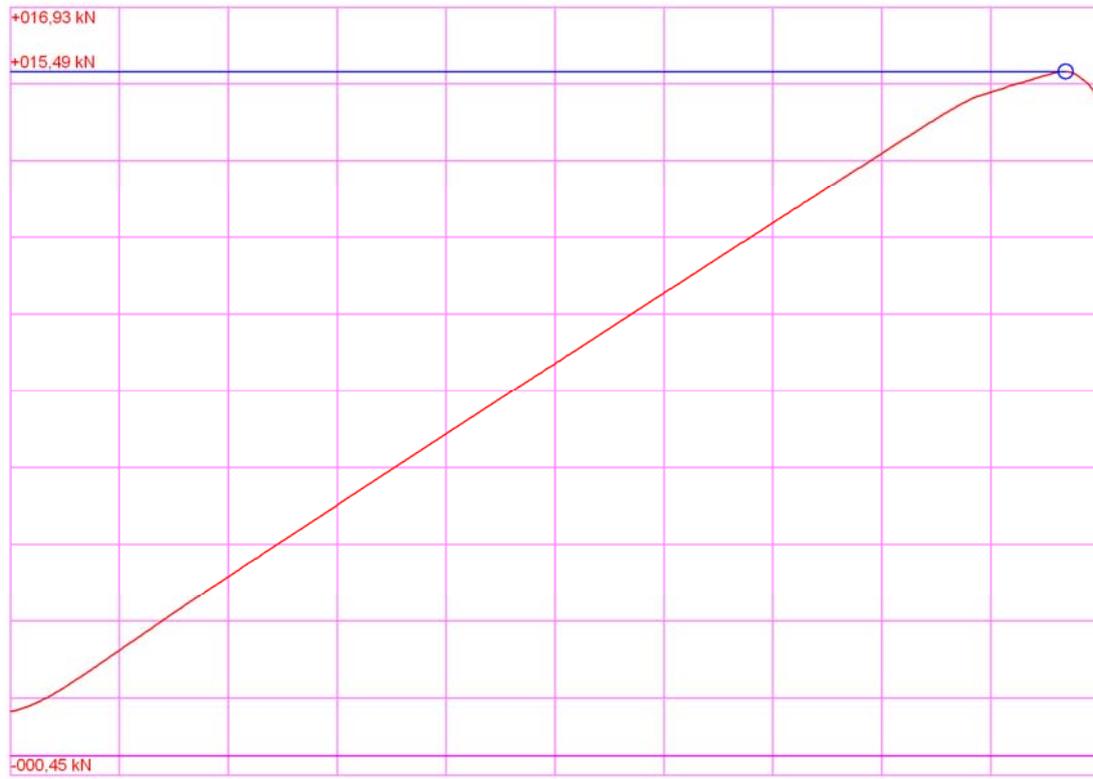


GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA



OBSERVACIONES

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	
Tipo de probeta	Cilíndrica
Nº de probeta	A3.8
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	29/11/2007
Fecha ensayo	28/12/2007
Edad de la probeta (Días)	90
Altura (mm)	180
Diámetro (mm)	150
Refrentado	Azufre
Peso probeta (Kg)	6,994
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,138
Carga de rotura (kN)	16,28
Tensión de rotura (MPa)	0,384

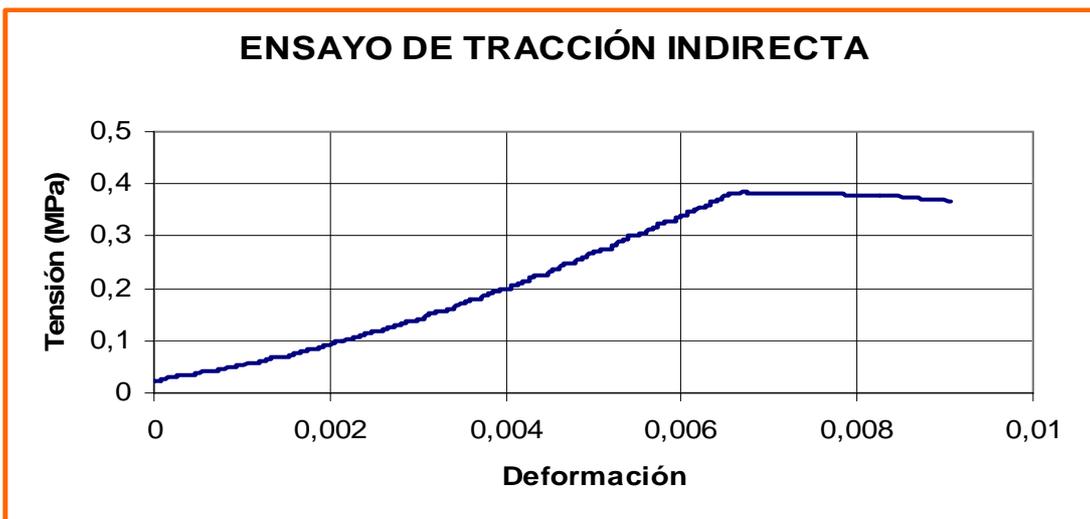
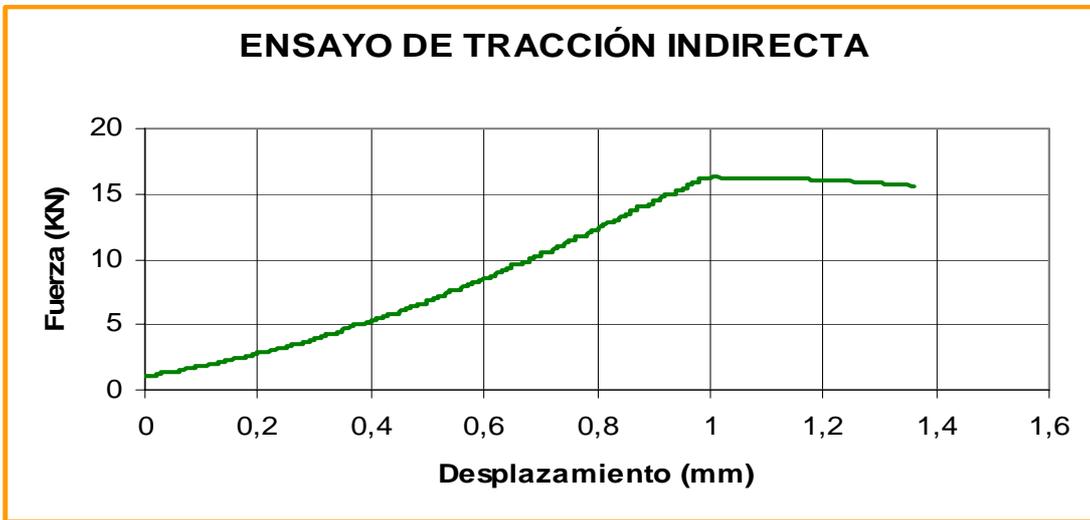
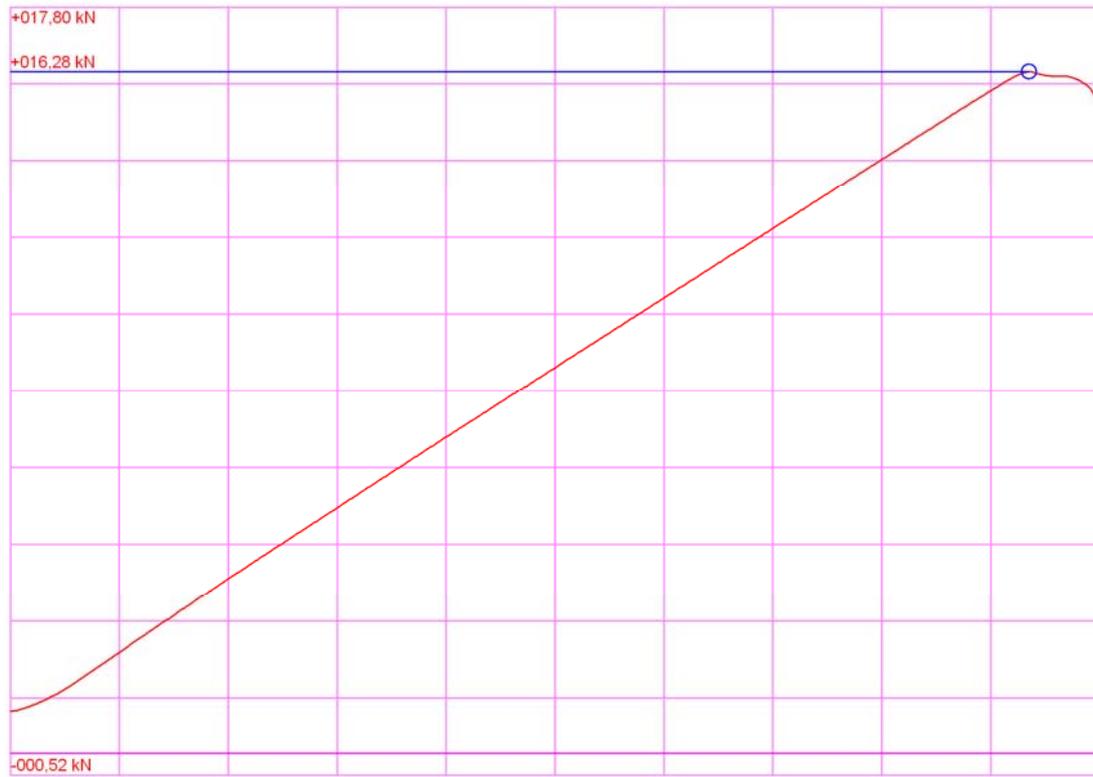


GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA



OBSERVACIONES

--

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	
Tipo de probeta	Cilíndrica
Nº de probeta	A3.9
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	29/11/2007
Fecha ensayo	28/12/2007
Edad de la probeta (Días)	90
Altura (mm)	180
Diámetro (mm)	150
Refrentado	Azufre
Peso probeta (Kg)	6,907
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,103
Carga de rotura (kN)	15,38
Tensión de rotura (MPa)	0,363

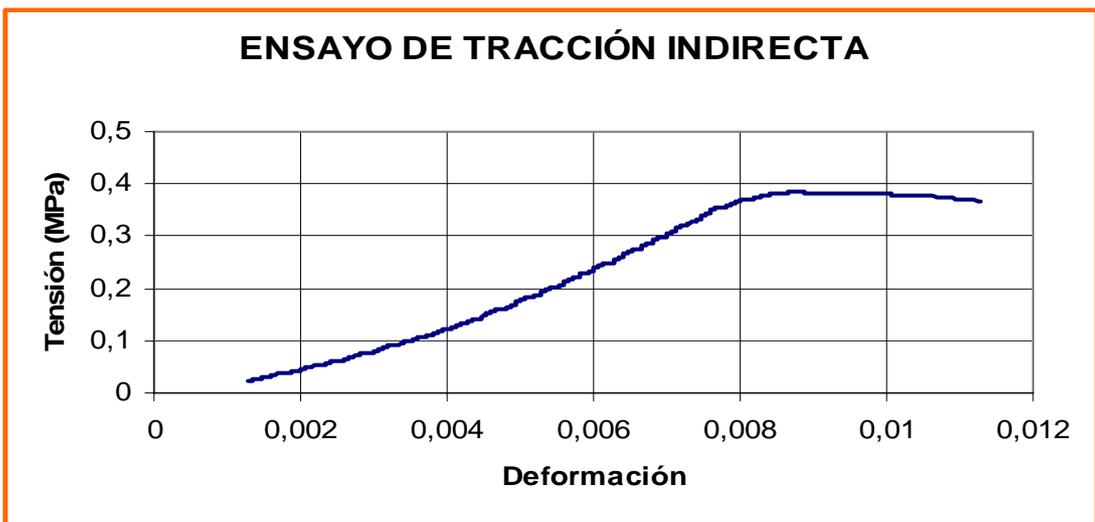
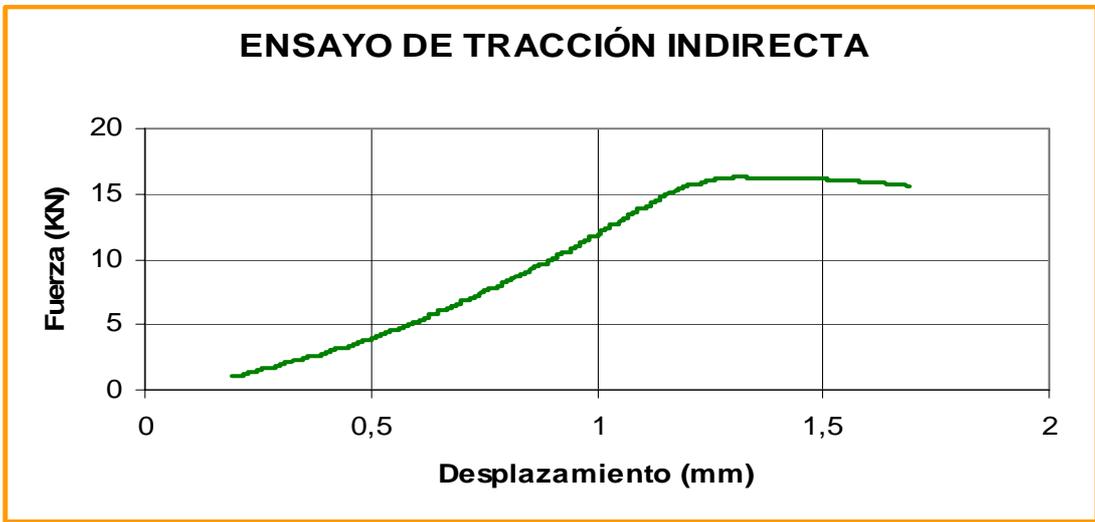
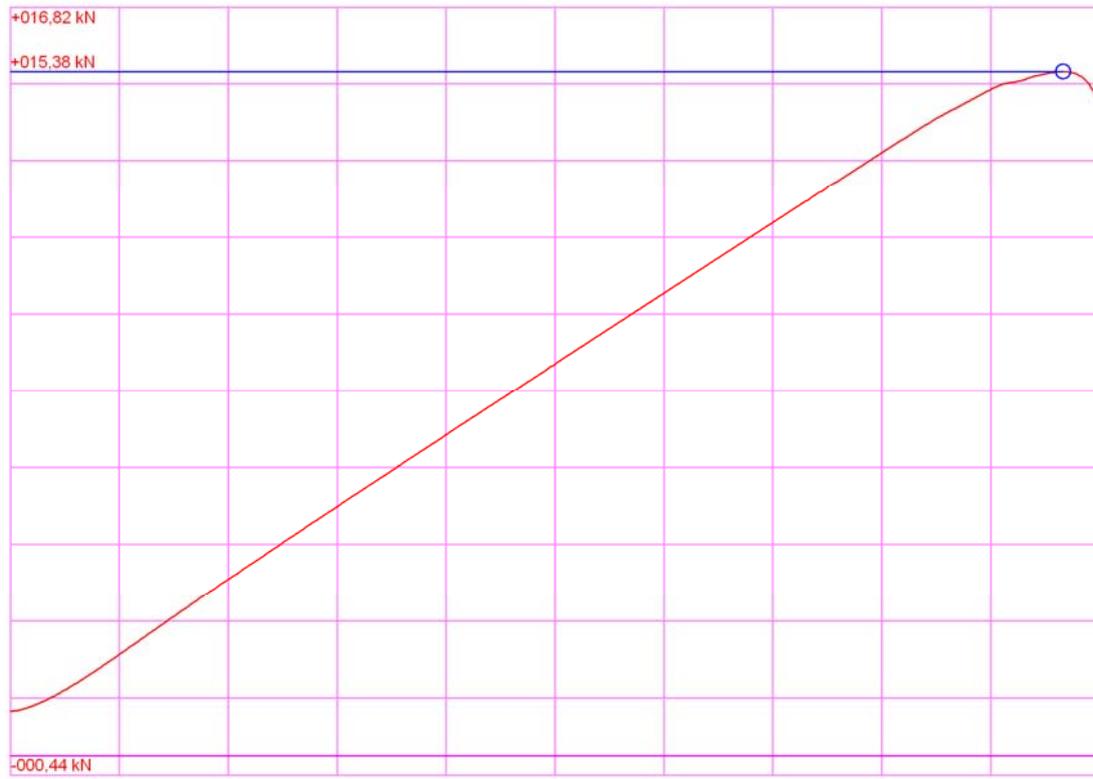


GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA



OBSERVACIONES

---

## ANEJO 5



## FICHAS DE ROTURA DE PROBETAS PRISMÁTICAS



## ÍNDICE

A5.1. ROTURA A FLEXOTRACCIÓN DE PROBETAS A LOS 7 DÍAS

A5.2. ROTURA A FLEXOTRACCIÓN DE PROBETAS A LOS 28 DÍAS

A5.3. ROTURA A COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETAS A LOS 7 DÍAS

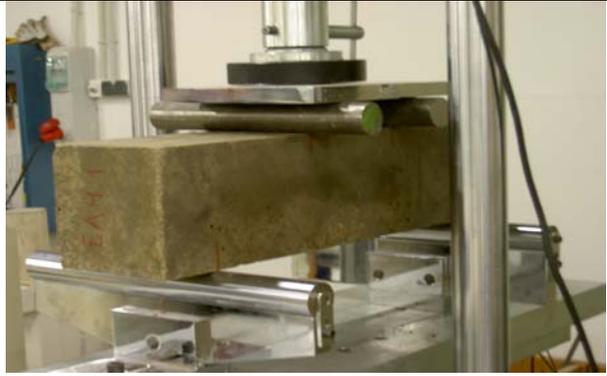
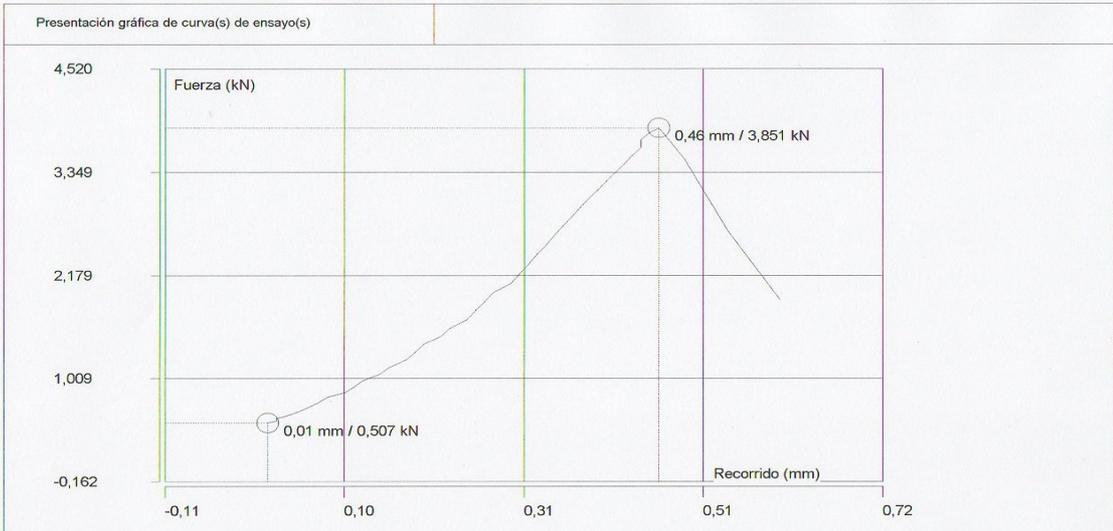
A5.4. ROTURA A COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETAS A LOS 28 DÍAS

A5.5. ROTURA A TRACCIÓN INDIRECTA DE PROBETAS A LOS 7 DÍAS

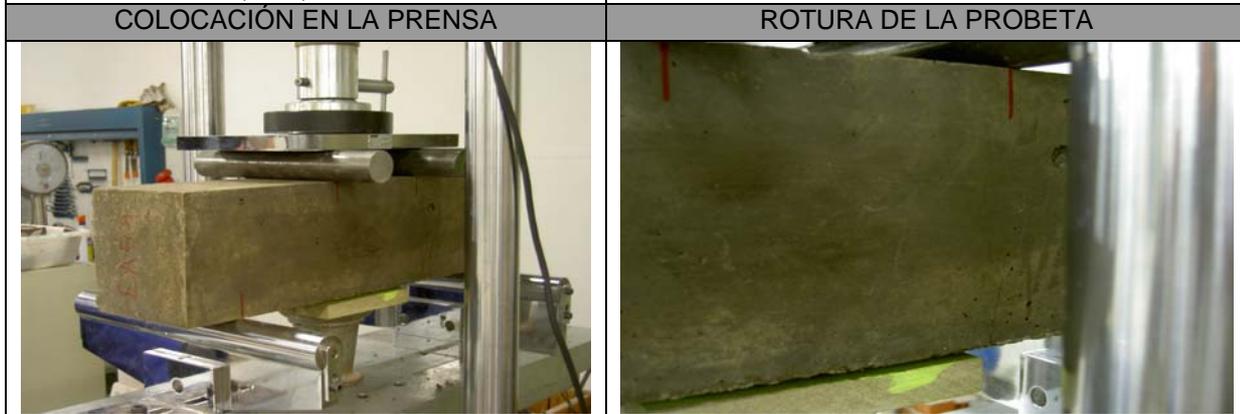
A5.6. ROTURA A TRACCIÓN INDIRECTA DE PROBETAS A LOS 28 DÍAS



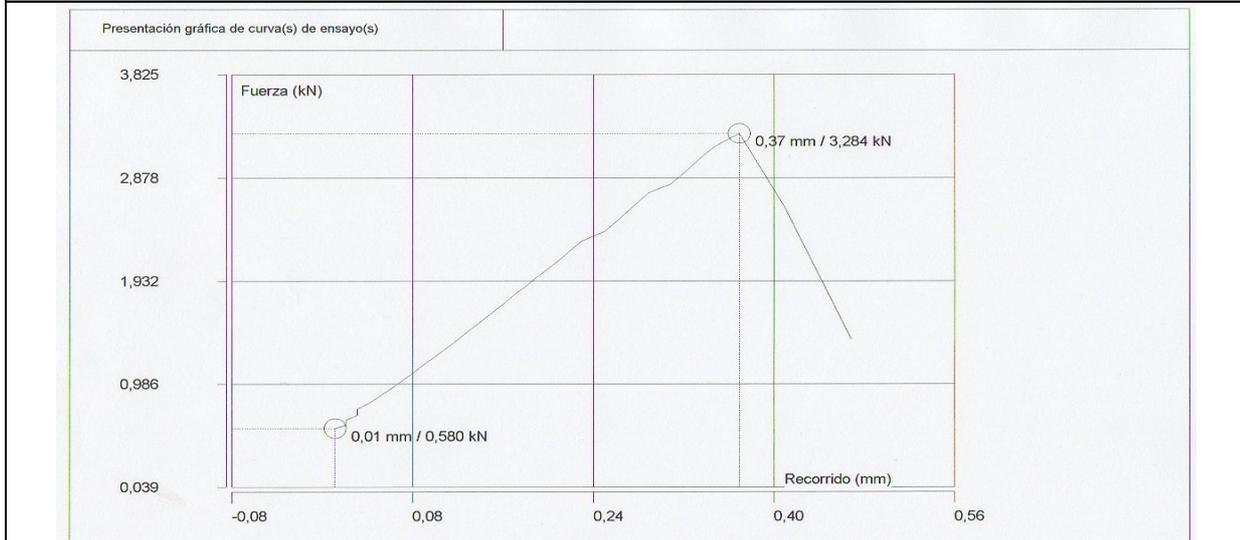
**A5.1. ROTURA A FLEXOTRACCIÓN DE PROBETAS A LOS 7 DÍAS**

<b>ENSAYO DE FLEXOTRACCIÓN</b>	
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)
Nº de probeta	EA4.1.
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	08/01/2008
Fecha ensayo	15/01/2008
Edad de la probeta (Días)	7
Longitud (mm)	600
Lados (mm)	150
Refrentado	No
Peso probeta (Kg)	29,84
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,076
Carga de rotura (kN)	3,851
Tensión de rotura (MPa)	0,533
<b>COLOCACIÓN EN LA PRENSA</b>	
	
<b>ROTURA DE LA PROBETA</b>	
	
<b>GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA</b>	
<p>Presentación gráfica de curva(s) de ensayo(s)</p>  <p>The graph displays the force-displacement relationship for the flexure test. The y-axis represents Force (Fuerza) in kN, ranging from -0,162 to 4,520. The x-axis represents Displacement (Recorrido) in mm, ranging from -0,11 to 0,72. The curve shows a linear elastic region up to approximately 0,507 kN and 0,01 mm, followed by a non-linear region leading to a peak load of 3,851 kN at a displacement of 0,46 mm. After the peak, the force decreases as displacement continues to increase.</p>	
<b>OBSERVACIONES</b>	

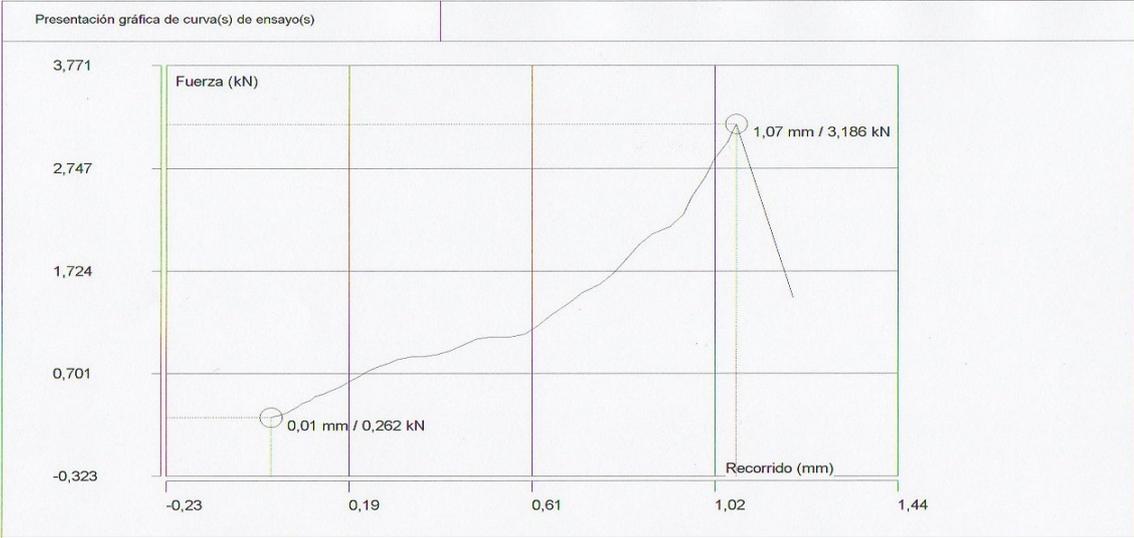
ENSAYO DE FLEXOTRACCIÓN	
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)
Nº de probeta	EA5.1.
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	08/01/2008
Fecha ensayo	15/01/2008
Edad de la probeta (Días)	7
Longitud (mm)	600
Lados (mm)	150
Refrentado	No
Peso probeta (Kg)	30,000
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,080
Carga de rotura (kN)	3,284
Tensión de rotura (MPa)	0,458

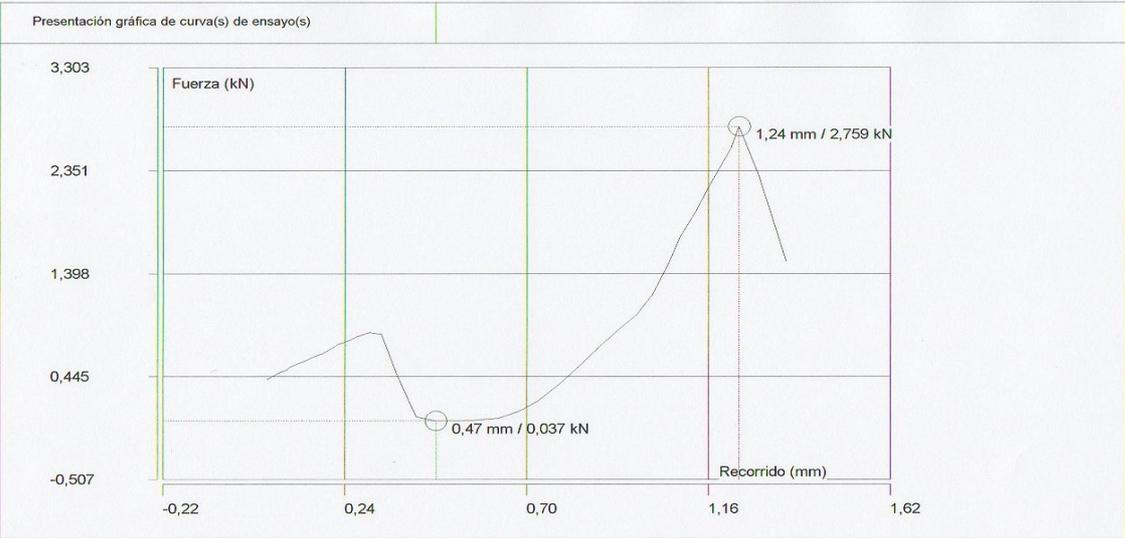


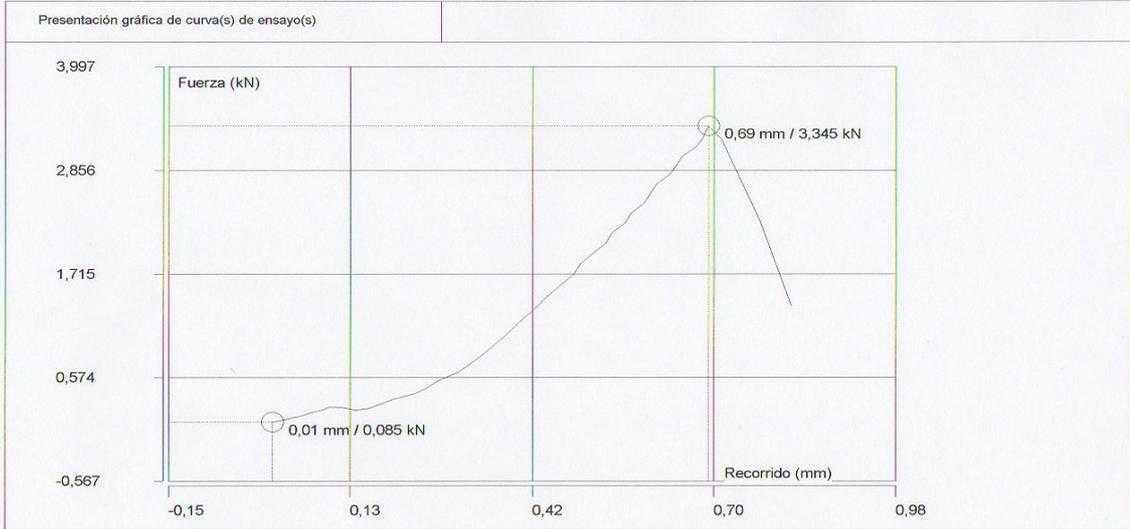
**GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA**

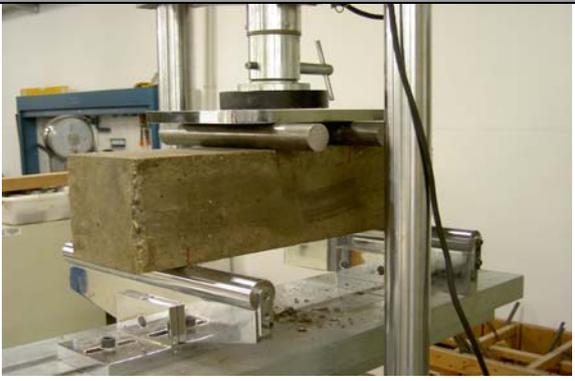
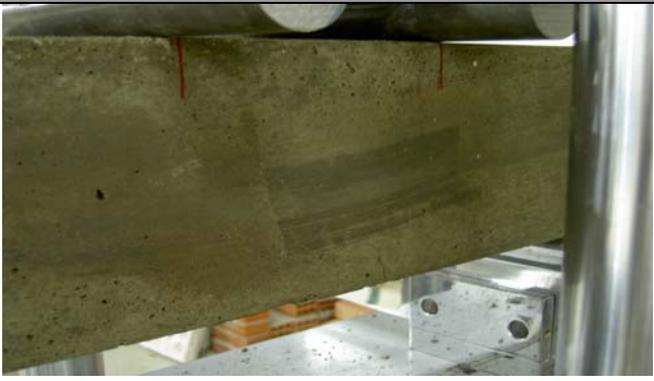
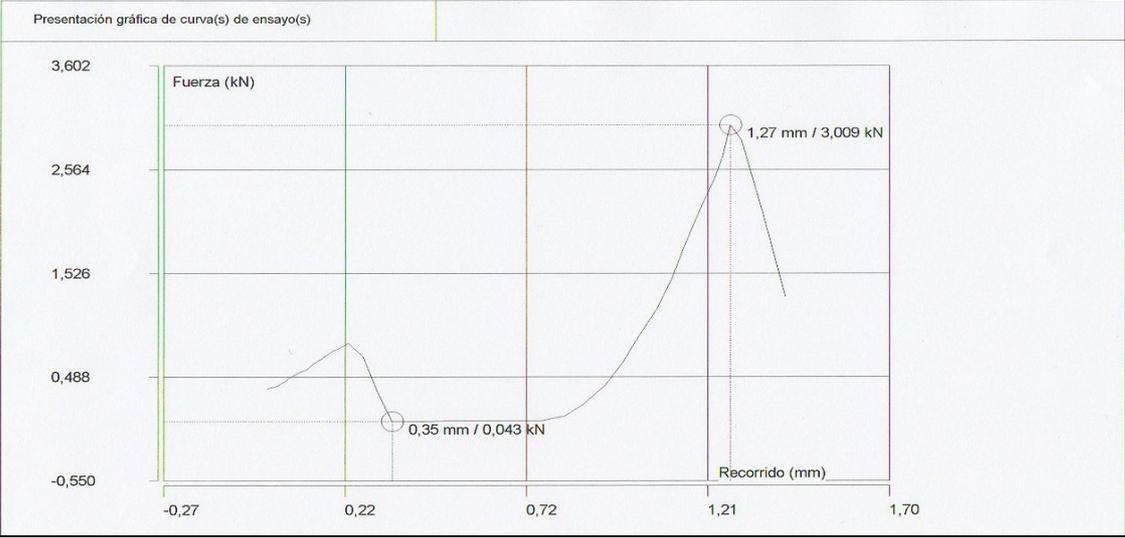


**OBSERVACIONES**

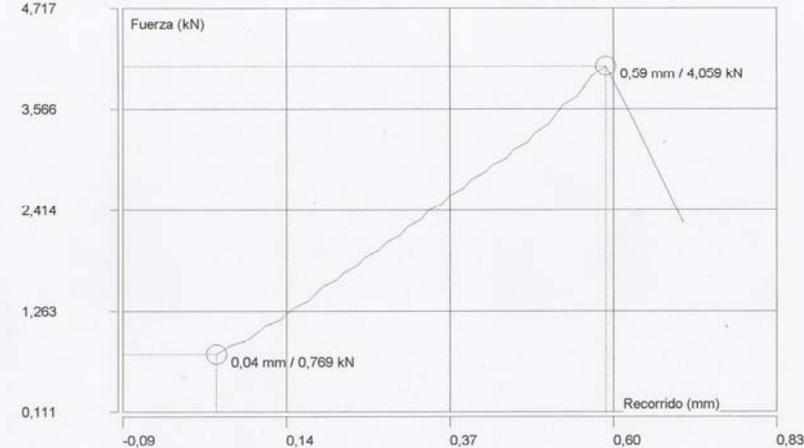
ENSAYO DE FLEXOTRACCIÓN	
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)
Nº de probeta	EA6.1.
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	08/01/2008
Fecha ensayo	15/01/2008
Edad de la probeta (Días)	7
Longitud (mm)	600
Lados (mm)	150
Refrentado	No
Peso probeta (Kg)	29,360
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,042
Carga de rotura (kN)	3,186
Tensión de rotura (MPa)	0,445
COLOCACIÓN EN LA PRENSA	ROTURA DE LA PROBETA
	
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA	
<p>Presentación gráfica de curva(s) de ensayo(s)</p>  <p>The graph displays the load-displacement curve for the flexure test. The vertical axis represents Force (Fuerza) in kN, ranging from -0,323 to 3,771. The horizontal axis represents Displacement (Recorrido) in mm, ranging from -0,23 to 1,44. Two key points are marked on the curve: an initial point at 0,01 mm / 0,262 kN and a peak point at 1,07 mm / 3,186 kN, which corresponds to the maximum load before failure.</p>	
OBSERVACIONES	

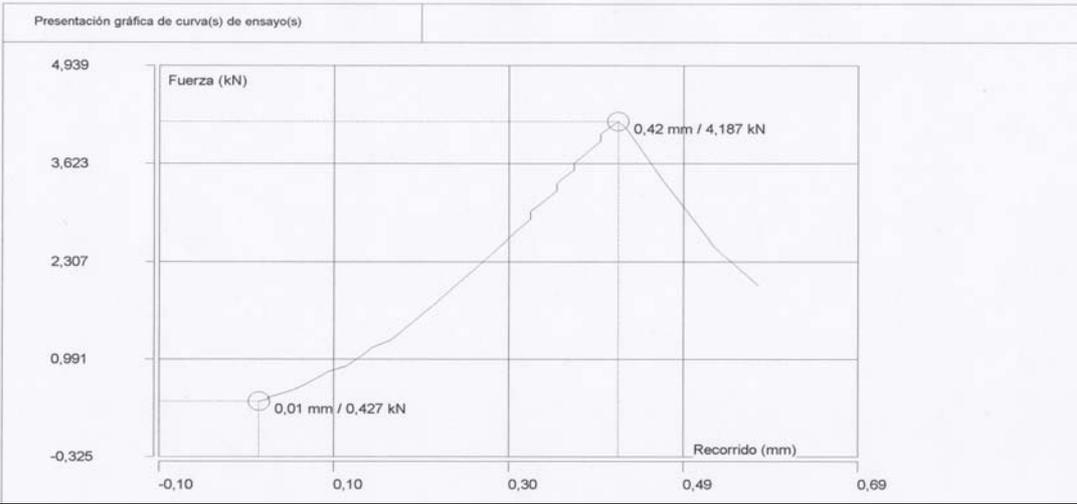
ENSAYO DE FLEXOTRACCIÓN	
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)
Nº de probeta	EA7.1.
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	09/01/2008
Fecha ensayo	16/01/2008
Edad de la probeta (Días)	7
Longitud (mm)	600
Lados (mm)	150
Refrentado	No
Peso probeta (Kg)	30,600
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,124
Carga de rotura (kN)	2,759
Tensión de rotura (MPa)	0,388
COLOCACIÓN EN LA PRENSA	
	
ROTURA DE LA PROBETA	
	
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA	
<p>Presentación gráfica de curva(s) de ensayo(s)</p>  <p>The graph displays the load-displacement curve for the flexure test. The y-axis represents Force (Fuerza) in kN, ranging from -0,507 to 3,303. The x-axis represents Displacement (Recorrido) in mm, ranging from -0,22 to 1,62. The curve shows an initial linear elastic region, followed by a yield point at 0,47 mm / 0,037 kN, and a final peak at 1,24 mm / 2,759 kN before failure.</p>	
OBSERVACIONES	

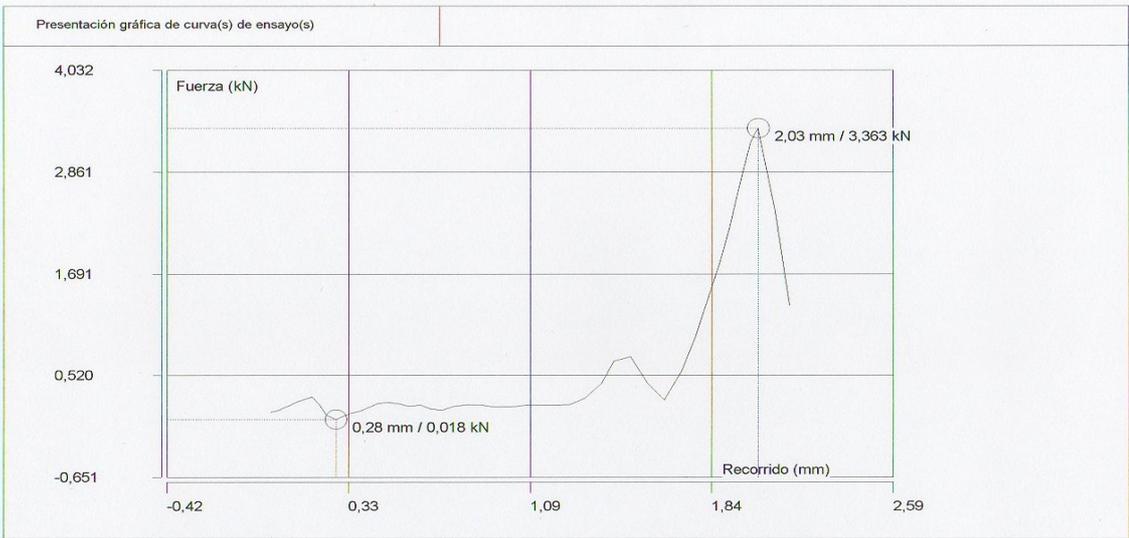
ENSAYO DE FLEXOTRACCIÓN							
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)						
Nº de probeta	EA8.1.						
Tipo de material	Reciclado de firme						
Fecha fabricación	09/01/2008						
Fecha ensayo	16/01/2008						
Edad de la probeta (Días)	7						
Longitud (mm)	600						
Lados (mm)	150						
Refrentado	No						
Peso probeta (Kg)	30,120						
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,094						
Carga de rotura (kN)	3,345						
Tensión de rotura (MPa)	0,466						
COLOCACIÓN EN LA PRENSA							
							
ROTURA DE LA PROBETA							
							
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA							
<p>Presentación gráfica de curva(s) de ensayo(s)</p>  <table border="1"> <caption>Data points from the load-displacement graph</caption> <thead> <tr> <th>Recorrido (mm)</th> <th>Fuerza (kN)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,01</td> <td>0,085</td> </tr> <tr> <td>0,69</td> <td>3,345</td> </tr> </tbody> </table>		Recorrido (mm)	Fuerza (kN)	0,01	0,085	0,69	3,345
Recorrido (mm)	Fuerza (kN)						
0,01	0,085						
0,69	3,345						
OBSERVACIONES							
<p> </p>							

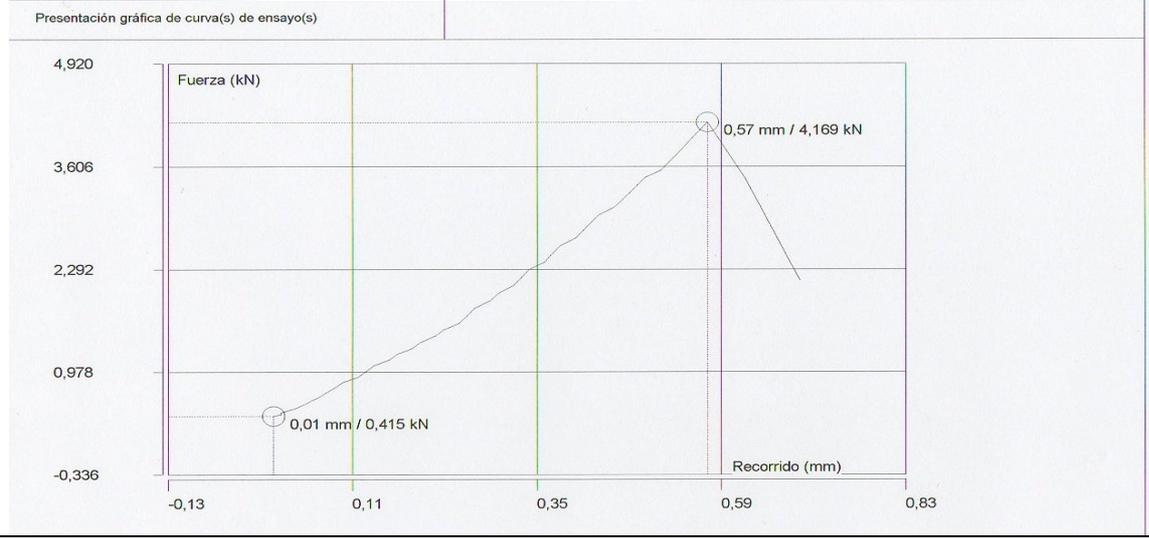
ENSAYO DE FLEXOTRACCIÓN							
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)						
Nº de probeta	EA9.1.						
Tipo de material	Reciclado de firme						
Fecha fabricación	09/01/2008						
Fecha ensayo	16/01/2008						
Edad de la probeta (Días)	7						
Longitud (mm)	600						
Lados (mm)	150						
Refrentado	No						
Peso probeta (Kg)	30,760						
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,130						
Carga de rotura (kN)	3,009						
Tensión de rotura (MPa)	0,421						
COLOCACIÓN EN LA PRENSA							
							
ROTURA DE LA PROBETA							
							
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA							
<p>Presentación gráfica de curva(s) de ensayo(s)</p>  <table border="1"> <caption>Data points from the force-displacement graph</caption> <thead> <tr> <th>Recorrido (mm)</th> <th>Fuerza (kN)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.35</td> <td>0.043</td> </tr> <tr> <td>1.27</td> <td>3.009</td> </tr> </tbody> </table>		Recorrido (mm)	Fuerza (kN)	0.35	0.043	1.27	3.009
Recorrido (mm)	Fuerza (kN)						
0.35	0.043						
1.27	3.009						
OBSERVACIONES							

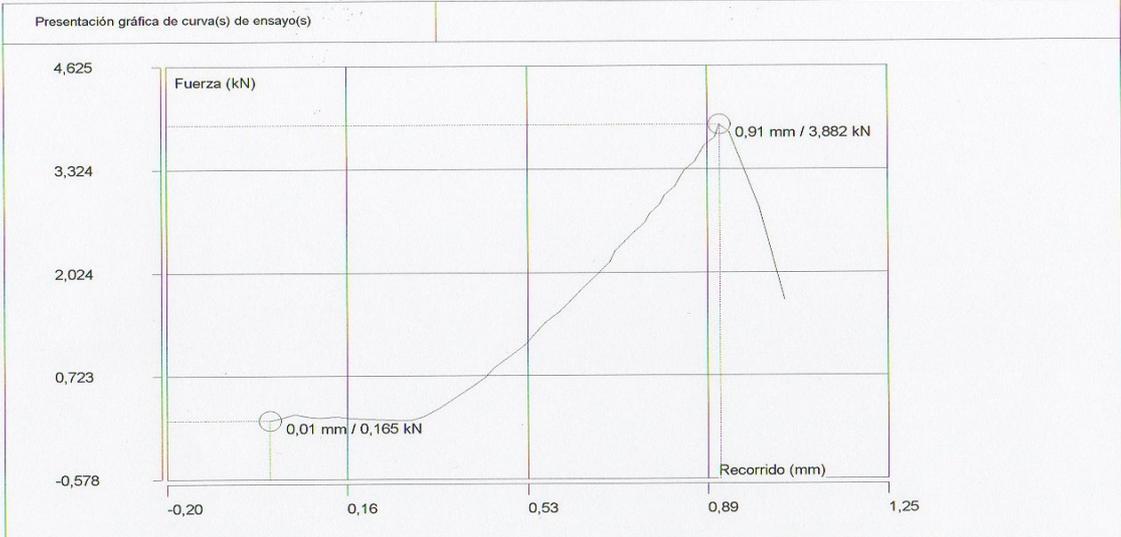
### A5.2. ROTURA A FLEXOTRACCIÓN DE PROBETAS A LOS 28 DÍAS

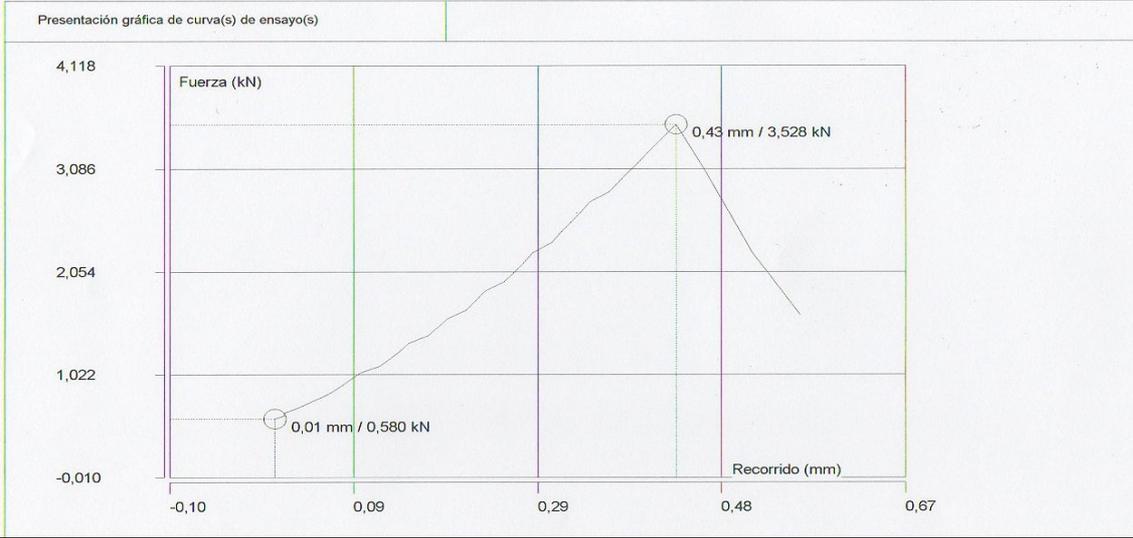
ENSAYO DE FLEXOTRACCIÓN	
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)
Nº de probeta	EA1.1.
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	03/01/2008
Fecha ensayo	31/01/2008
Edad de la probeta (Días)	28
Longitud (mm)	600
Lados (mm)	150
Refrentado	No
Peso probeta (Kg)	29,98
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,101
Carga de rotura (kN)	4,059
Tensión de rotura (MPa)	0,561
COLOCACIÓN EN LA PRENSA	ROTURA DE LA PROBETA
	
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA	
<p>Presentación gráfica de curva(s) de ensayo(s)</p>  <p>The graph displays the force-displacement relationship for the flexure test. The vertical axis represents Force (Fuerza) in kN, ranging from 0,111 to 4,717. The horizontal axis represents Displacement (Recorrido) in mm, ranging from -0,09 to 0,83. The curve shows a linear elastic region up to a peak force of 4,059 kN at a displacement of 0,59 mm, followed by a sharp drop in force. A secondary point is marked at 0,04 mm / 0,769 kN.</p>	
OBSERVACIONES	

ENSAYO DE FLEXOTRACCIÓN							
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)						
Nº de probeta	EA1.2.						
Tipo de material	Reciclado de firme						
Fecha fabricación	03/01/2008						
Fecha ensayo	31/01/2008						
Edad de la probeta (Días)	28						
Longitud (mm)	600						
Lados (mm)	150						
Refrentado	No						
Peso probeta (Kg)	30,2						
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,106						
Carga de rotura (kN)	4,187						
Tensión de rotura (MPa)	0,578						
COLOCACIÓN EN LA PRENSA	ROTURA DE LA PROBETA						
							
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA							
<p>Presentación gráfica de curva(s) de ensayo(s)</p>  <table border="1"> <caption>Data points from the force-displacement graph</caption> <thead> <tr> <th>Recorrido (mm)</th> <th>Fuerza (kN)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.01</td> <td>0.427</td> </tr> <tr> <td>0.42</td> <td>4.187</td> </tr> </tbody> </table>		Recorrido (mm)	Fuerza (kN)	0.01	0.427	0.42	4.187
Recorrido (mm)	Fuerza (kN)						
0.01	0.427						
0.42	4.187						
OBSERVACIONES							

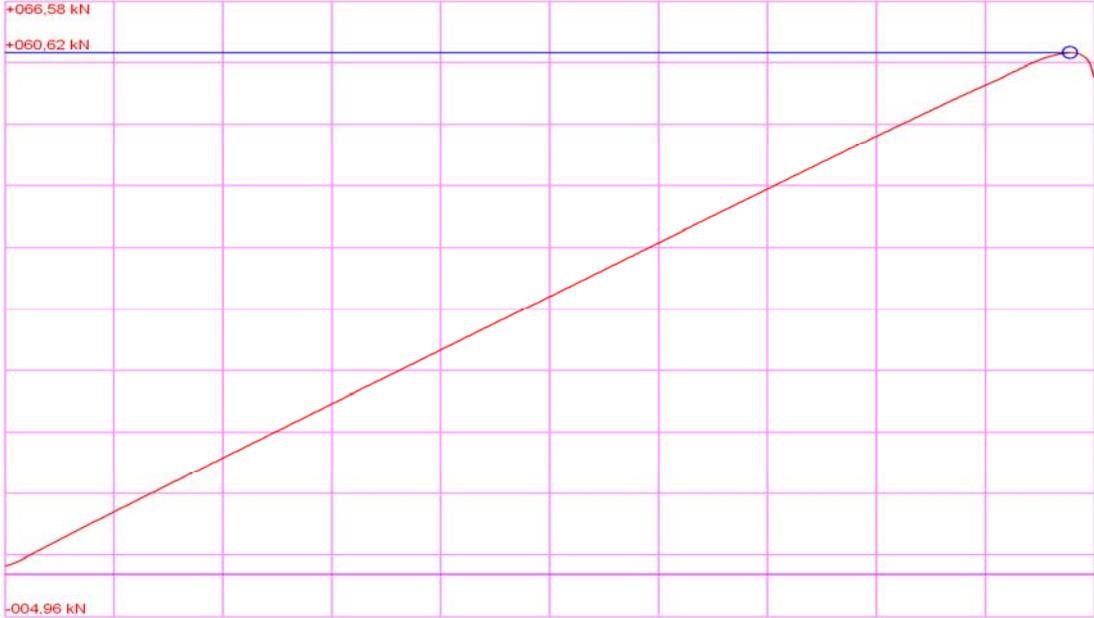
ENSAYO DE FLEXOTRACCIÓN							
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)						
Nº de probeta	EA2.1.						
Tipo de material	Reciclado de firme						
Fecha fabricación	03/01/2008						
Fecha ensayo	31/01/2008						
Edad de la probeta (Días)	28						
Longitud (mm)	600						
Lados (mm)	150						
Refrentado	No						
Peso probeta (Kg)	30,3						
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,108						
Carga de rotura (kN)	3,363						
Tensión de rotura (MPa)	0,468						
COLOCACIÓN EN LA PRENSA							
							
ROTURA DE LA PROBETA							
							
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA							
<p>Presentación gráfica de curva(s) de ensayo(s)</p>  <table border="1"> <caption>Data points from the load-displacement graph</caption> <thead> <tr> <th>Recorrido (mm)</th> <th>Fuerza (kN)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,28</td> <td>0,018</td> </tr> <tr> <td>2,03</td> <td>3,363</td> </tr> </tbody> </table>		Recorrido (mm)	Fuerza (kN)	0,28	0,018	2,03	3,363
Recorrido (mm)	Fuerza (kN)						
0,28	0,018						
2,03	3,363						
OBSERVACIONES							

ENSAYO DE FLEXOTRACCIÓN							
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)						
Nº de probeta	EA2.2.						
Tipo de material	Reciclado de firme						
Fecha fabricación	03/01/2008						
Fecha ensayo	31/01/2008						
Edad de la probeta (Días)	28						
Longitud (mm)	600						
Lados (mm)	150						
Refrentado	No						
Peso probeta (Kg)	30,64						
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,125						
Carga de rotura (kN)	4,169						
Tensión de rotura (MPa)	0,576						
COLOCACIÓN EN LA PRENSA							
							
ROTURA DE LA PROBETA							
							
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA							
<p>Presentación gráfica de curva(s) de ensayo(s)</p>  <table border="1"> <caption>Data points from the load-displacement graph</caption> <thead> <tr> <th>Recorrido (mm)</th> <th>Fuerza (kN)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,01</td> <td>0,415</td> </tr> <tr> <td>0,57</td> <td>4,169</td> </tr> </tbody> </table>		Recorrido (mm)	Fuerza (kN)	0,01	0,415	0,57	4,169
Recorrido (mm)	Fuerza (kN)						
0,01	0,415						
0,57	4,169						
OBSERVACIONES							

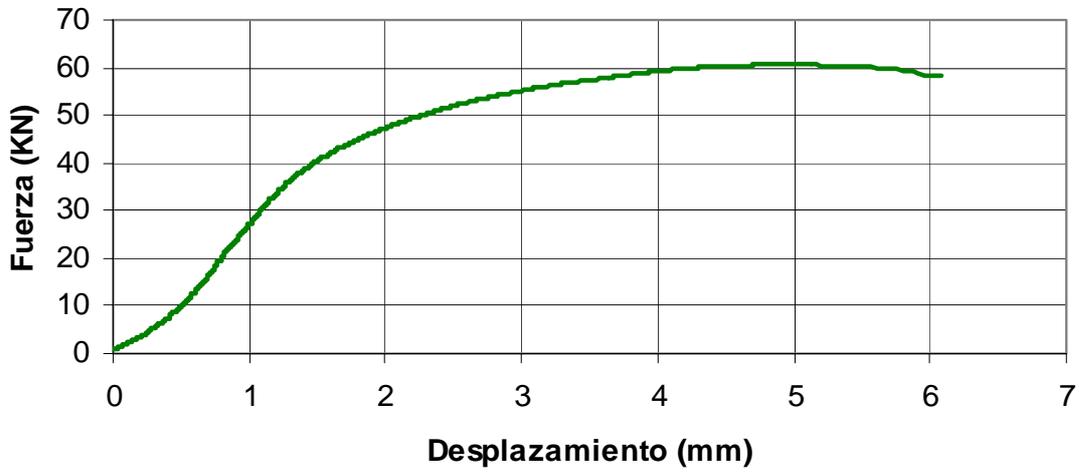
ENSAYO DE FLEXOTRACCIÓN							
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)						
Nº de probeta	EA3.1.						
Tipo de material	Reciclado de firme						
Fecha fabricación	03/01/2008						
Fecha ensayo	31/01/2008						
Edad de la probeta (Días)	28						
Longitud (mm)	600						
Lados (mm)	150						
Refrentado	No						
Peso probeta (Kg)	29,98						
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,099						
Carga de rotura (kN)	3,882						
Tensión de rotura (MPa)	0,537						
COLOCACIÓN EN LA PRENSA	ROTURA DE LA PROBETA						
							
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA							
<p>Presentación gráfica de curva(s) de ensayo(s)</p>  <table border="1"> <caption>Data points from the load-displacement graph</caption> <thead> <tr> <th>Recorrido (mm)</th> <th>Fuerza (kN)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,01</td> <td>0,165</td> </tr> <tr> <td>0,91</td> <td>3,882</td> </tr> </tbody> </table>		Recorrido (mm)	Fuerza (kN)	0,01	0,165	0,91	3,882
Recorrido (mm)	Fuerza (kN)						
0,01	0,165						
0,91	3,882						
OBSERVACIONES							

ENSAYO DE FLEXOTRACCIÓN							
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)						
Nº de probeta	EA3.2.						
Tipo de material	Reciclado de firme						
Fecha fabricación	03/01/2008						
Fecha ensayo	31/01/2008						
Edad de la probeta (Días)	28						
Longitud (mm)	600						
Lados (mm)	150						
Refrentado	No						
Peso probeta (Kg)	29,98						
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,084						
Carga de rotura (kN)	3,528						
Tensión de rotura (MPa)	0,490						
COLOCACIÓN EN LA PRENSA							
							
ROTURA DE LA PROBETA							
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA							
<p>Presentación gráfica de curva(s) de ensayo(s)</p>  <table border="1"> <caption>Data points from the load-displacement graph</caption> <thead> <tr> <th>Recorrido (mm)</th> <th>Fuerza (kN)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,01</td> <td>0,580</td> </tr> <tr> <td>0,43</td> <td>3,528</td> </tr> </tbody> </table>		Recorrido (mm)	Fuerza (kN)	0,01	0,580	0,43	3,528
Recorrido (mm)	Fuerza (kN)						
0,01	0,580						
0,43	3,528						
OBSERVACIONES							

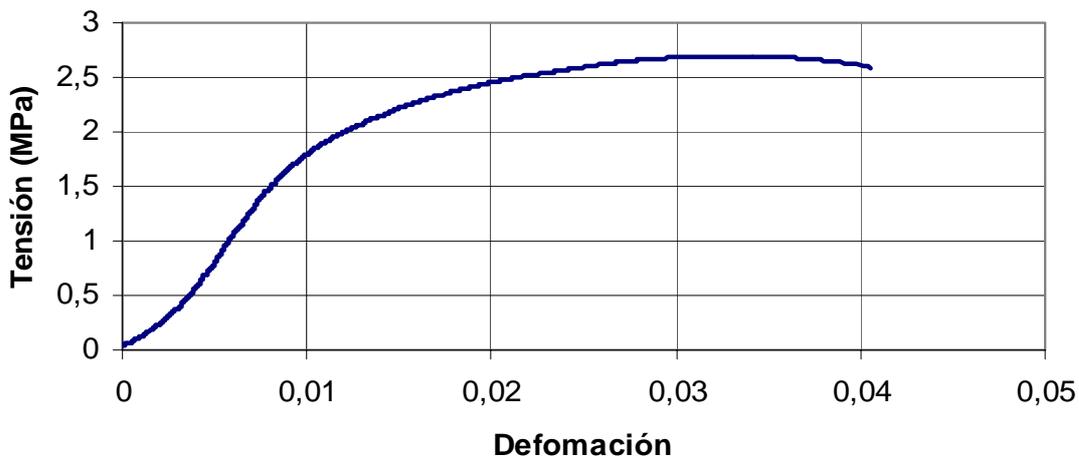
### A5.3. ROTURA A COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETAS A LOS 7 DÍAS

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE	
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)
Nº de probeta	EA4.1.a
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	08/01/2008
Fecha ensayo	15/01/2008
Edad de la probeta (Días)	7
Longitud (mm)	320
Lados (mm)	150
Refrentado	No
Peso probeta (Kg)	17,38
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,076
Carga de rotura (kN)	60,610
Tensión de rotura (MPa)	2,694
COLOCACIÓN EN LA PRENSA	ROTURA DE LA PROBETA
	
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA	
 <p>The graph displays a linear load-displacement curve. The vertical axis (Load) ranges from -004.96 kN to +066.58 kN. The horizontal axis (Displacement) is marked with a grid. The curve starts at the origin, rises linearly to a peak load of +060.62 kN, and then exhibits a slight post-peak softening before failure.</p>	

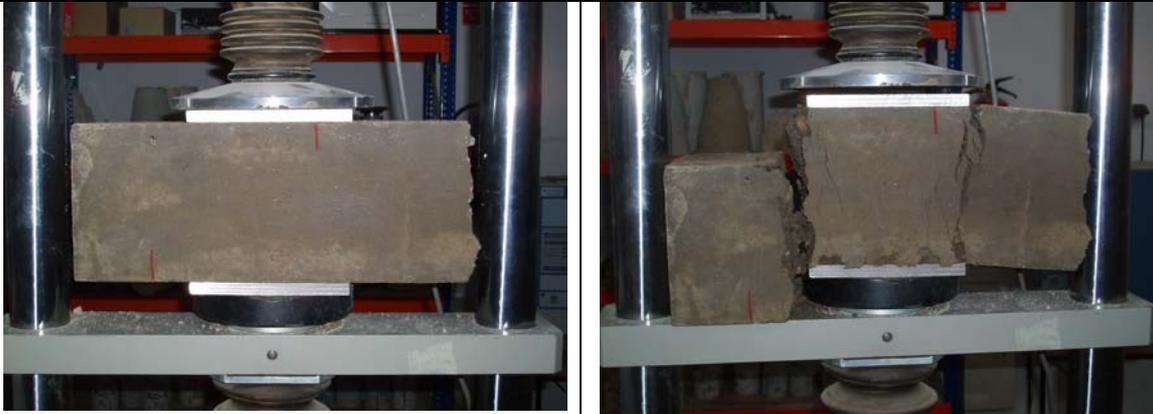
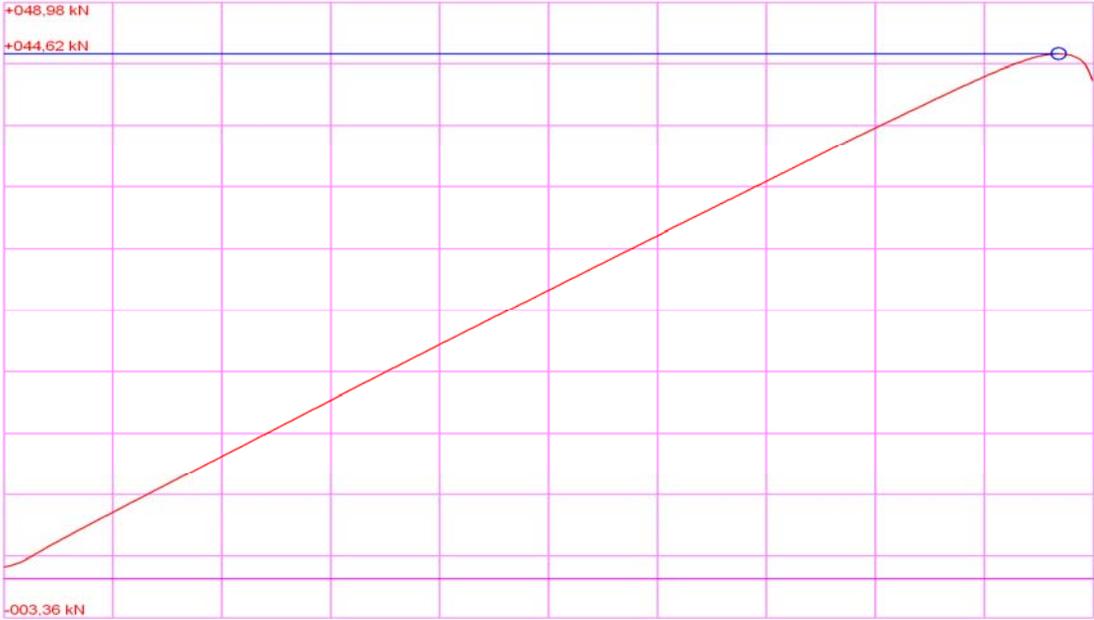
### ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE

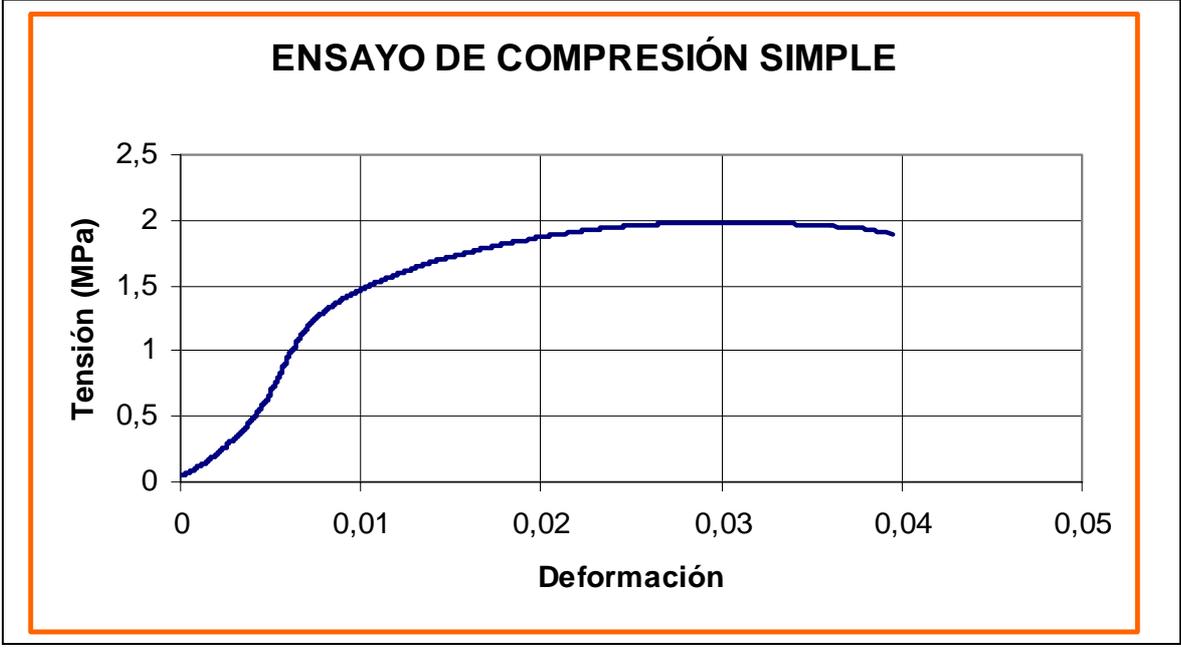
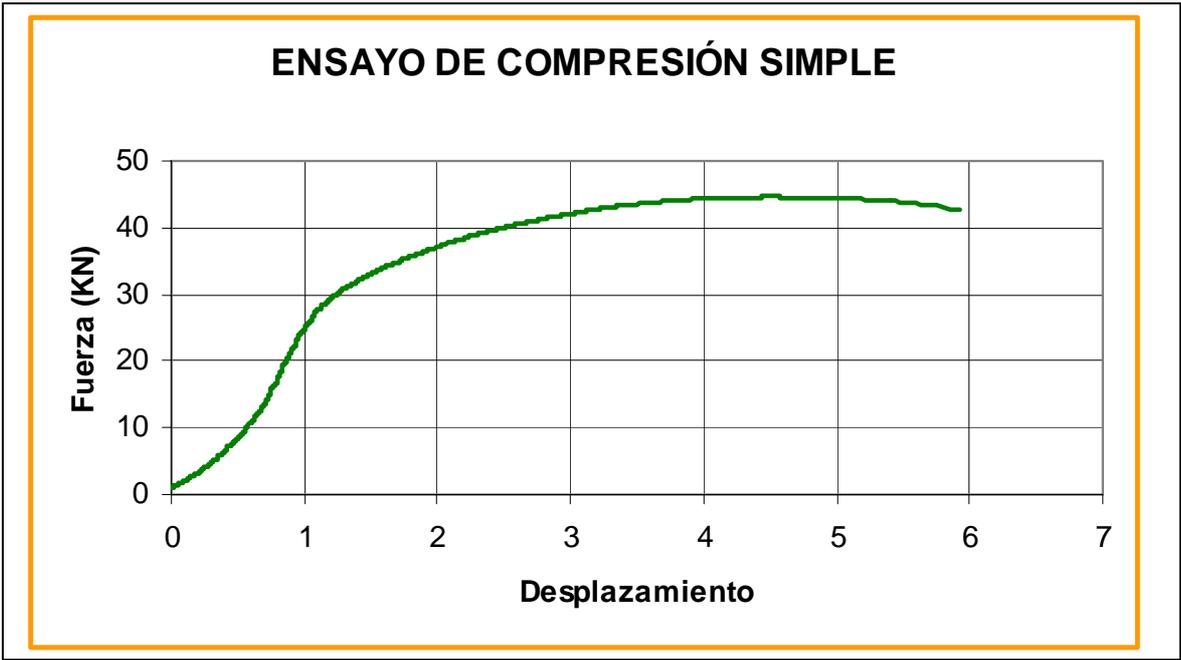


### ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE

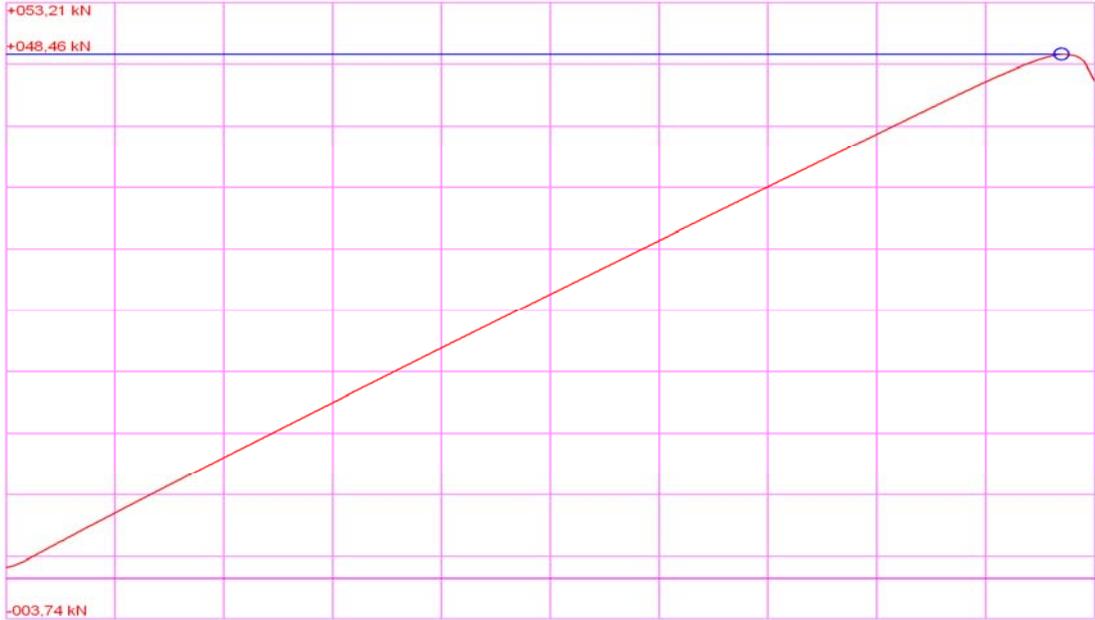


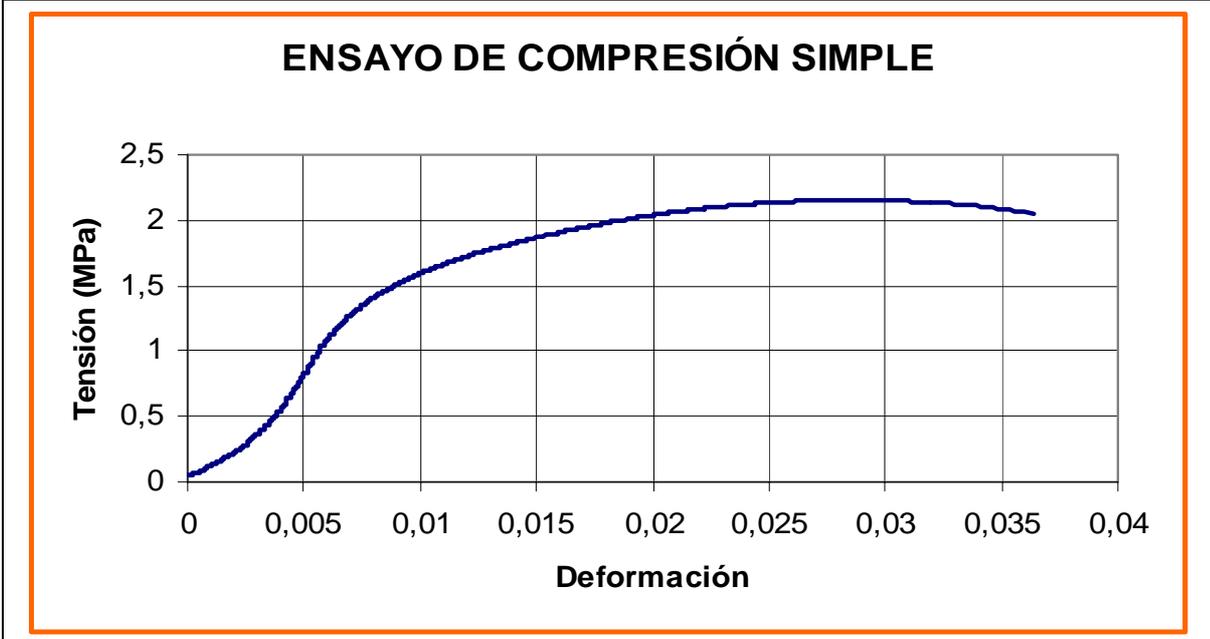
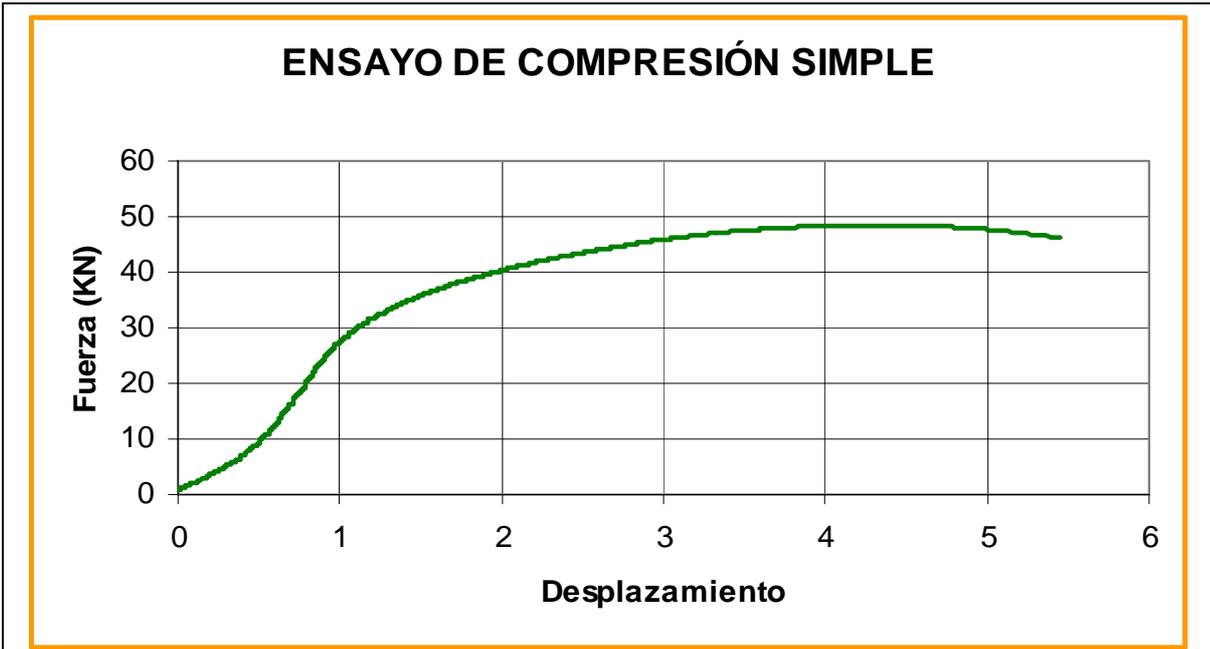
#### OBSERVACIONES

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE	
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)
Nº de probeta	EA5.1.a
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	08/01/2008
Fecha ensayo	15/01/2008
Edad de la probeta (Días)	7
Longitud (mm)	365
Lados (mm)	150
Refrentado	No
Peso probeta (Kg)	18,46
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,080
Carga de rotura (kN)	44,620
Tensión de rotura (MPa)	1,983
COLOCACIÓN EN LA PRENSA	
	
ROTURA DE LA PROBETA	
	
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA	
	

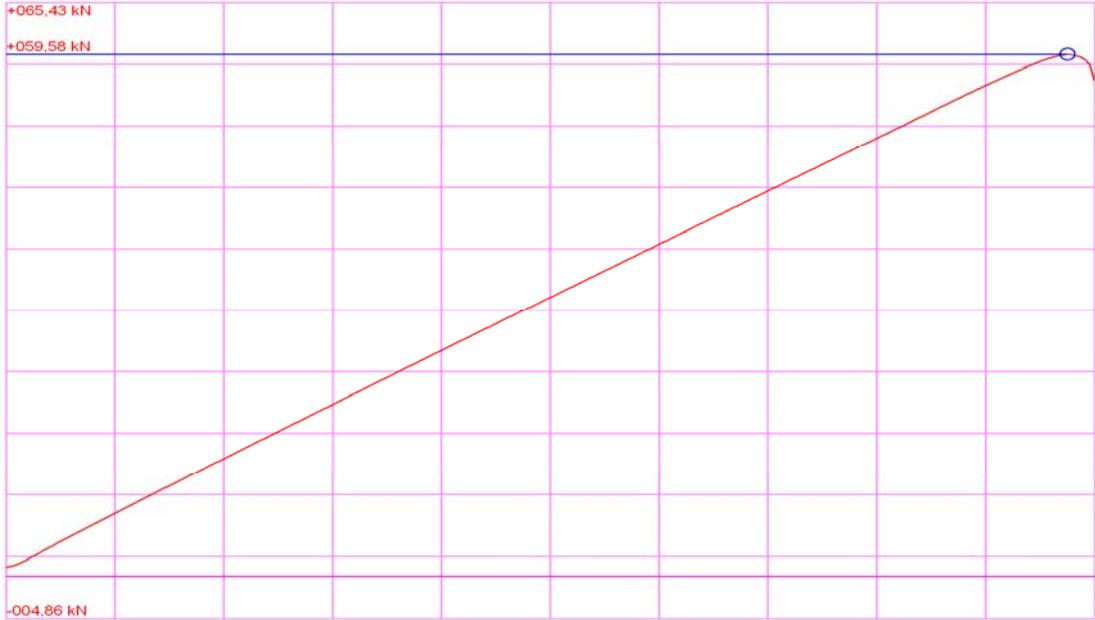


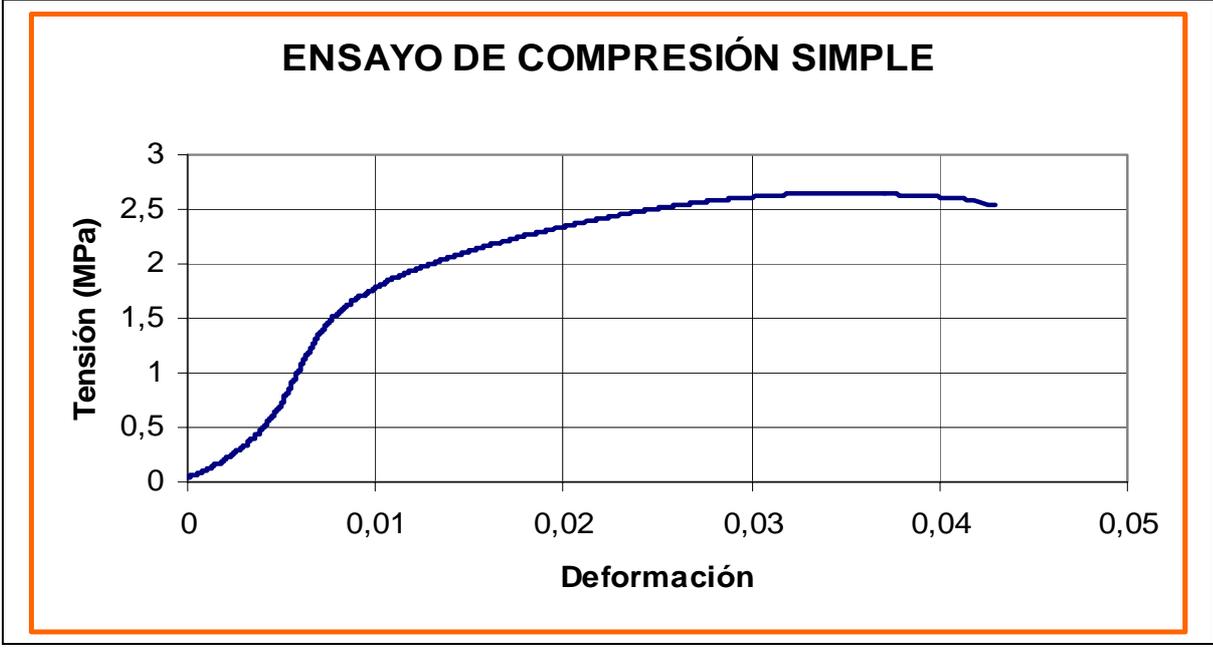
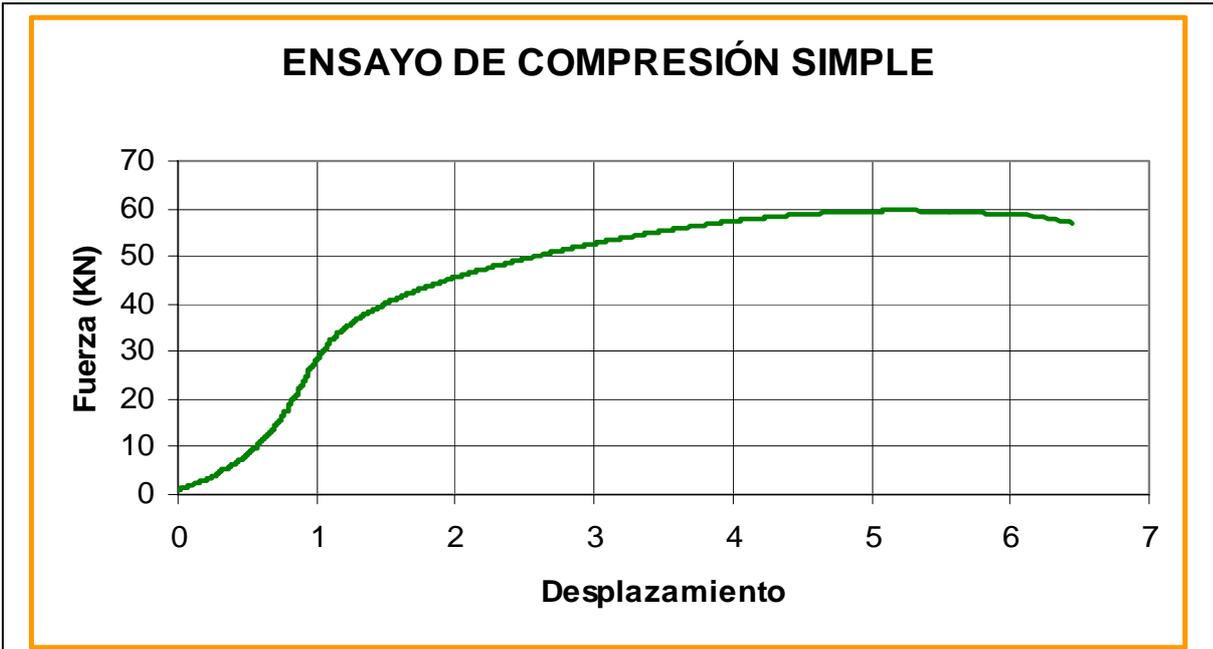
OBSERVACIONES

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE	
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)
Nº de probeta	EA6.1.a
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	08/01/2008
Fecha ensayo	15/01/2008
Edad de la probeta (Días)	7
Longitud (mm)	350
Lados (mm)	150
Refrentado	No
Peso probeta (Kg)	17,06
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,042
Carga de rotura (kN)	48,460
Tensión de rotura (MPa)	2,154
COLOCACIÓN EN LA PRENSA	
	
ROTURA DE LA PROBETA	
	
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA	
	

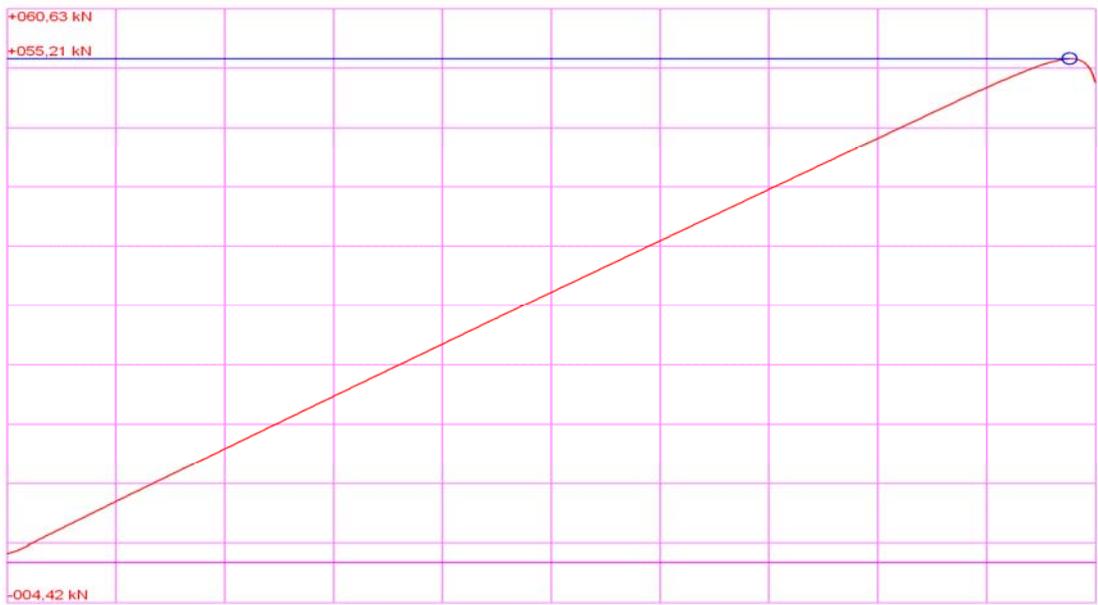


OBSERVACIONES

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE	
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)
Nº de probeta	EA7.1.a
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	09/01/2008
Fecha ensayo	16/01/2008
Edad de la probeta (Días)	7
Longitud (mm)	305
Lados (mm)	150
Refrentado	No
Peso probeta (Kg)	15,92
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,124
Carga de rotura (kN)	59,580
Tensión de rotura (MPa)	2,648
COLOCACIÓN EN LA PRENSA	
	
ROTURA DE LA PROBETA	
	
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA	
	



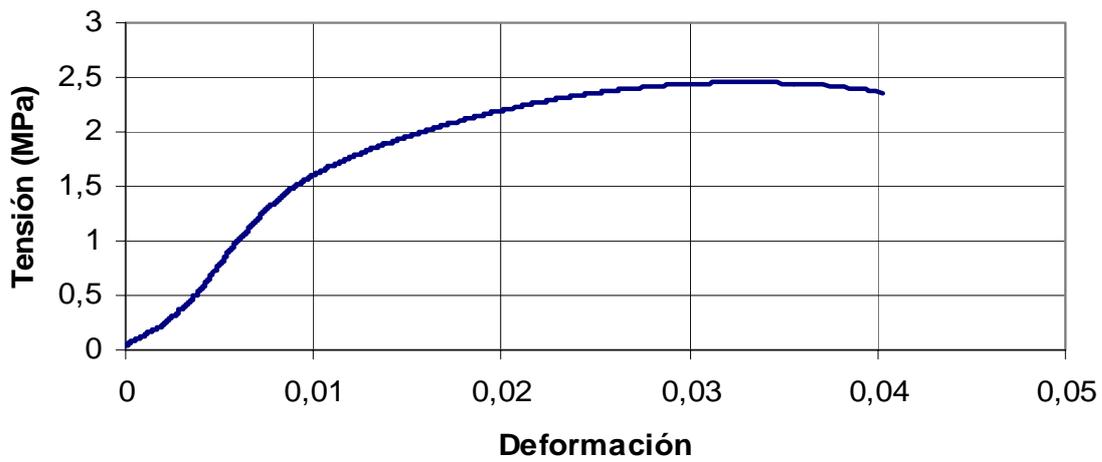
OBSERVACIONES

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE	
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)
Nº de probeta	EA8.1.a
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	09/01/2008
Fecha ensayo	16/01/2008
Edad de la probeta (Días)	7
Longitud (mm)	305
Lados (mm)	150
Refrentado	No
Peso probeta (Kg)	15,66
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,094
Carga de rotura (kN)	55,210
Tensión de rotura (MPa)	2,454
COLOCACIÓN EN LA PRENSA	
	
ROTURA DE LA PROBETA	
	
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA	
	

### ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE

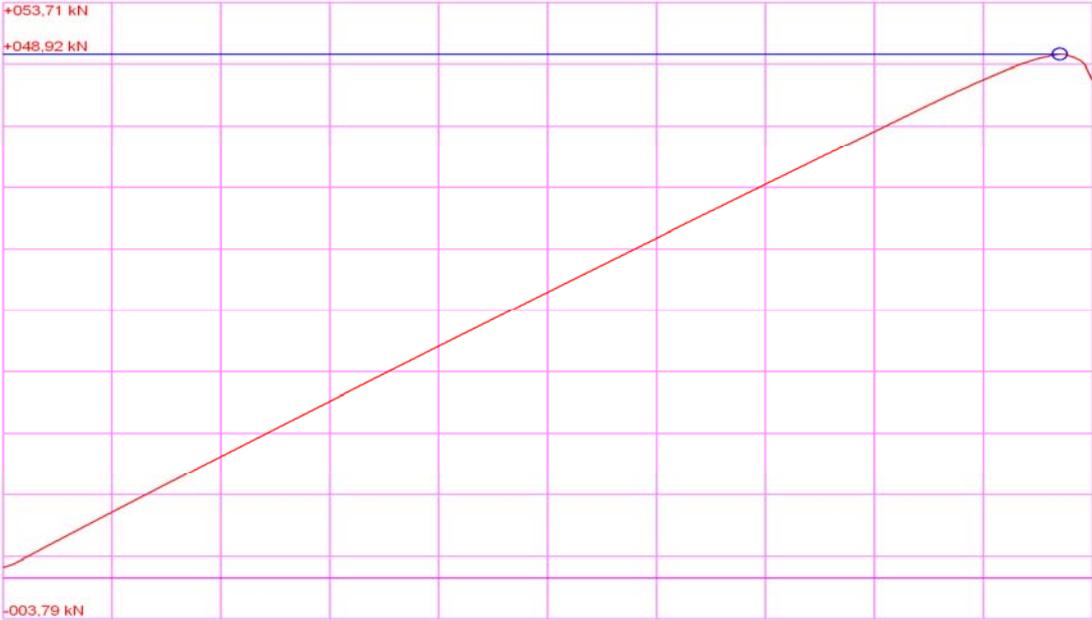


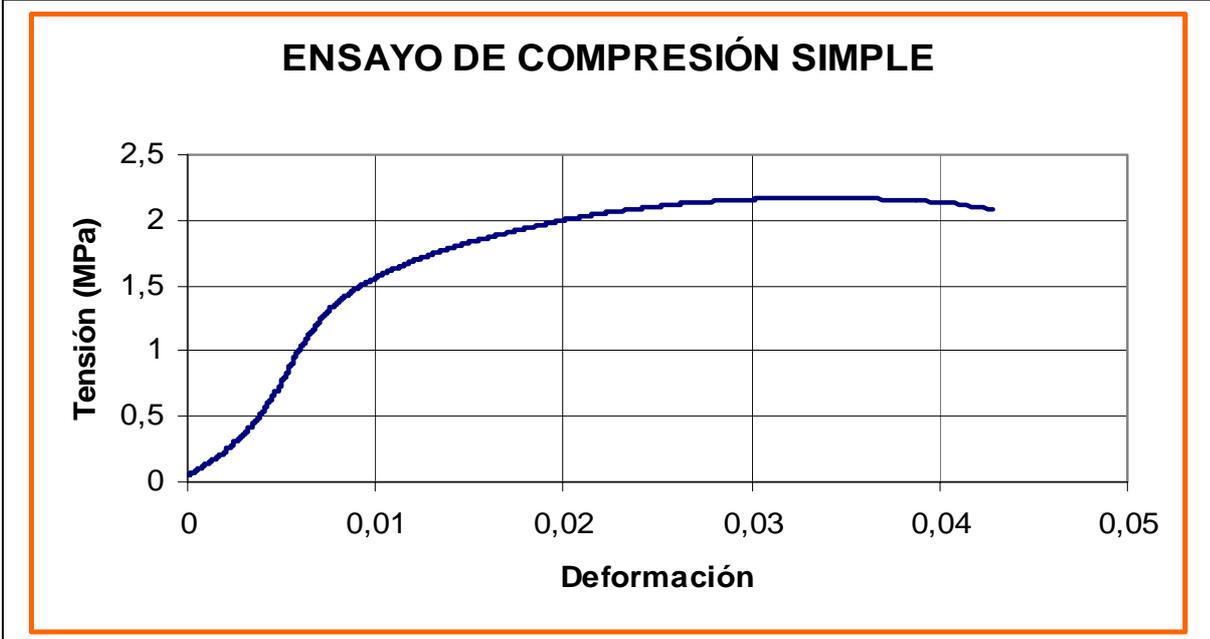
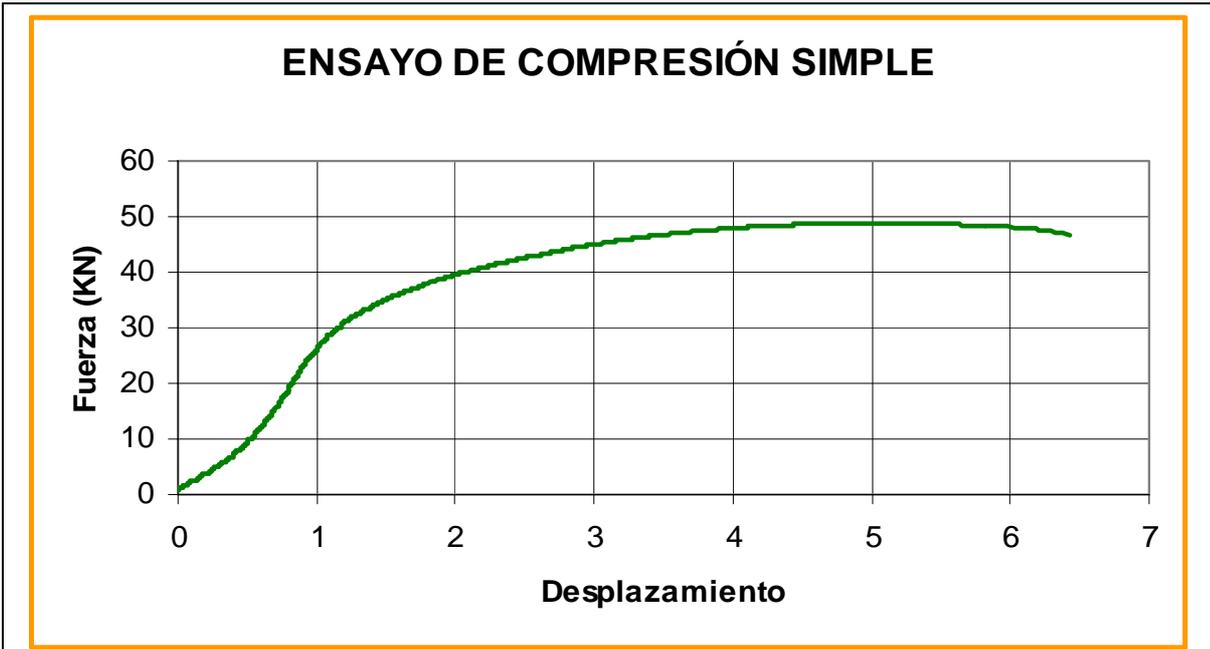
### ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE



#### OBSERVACIONES

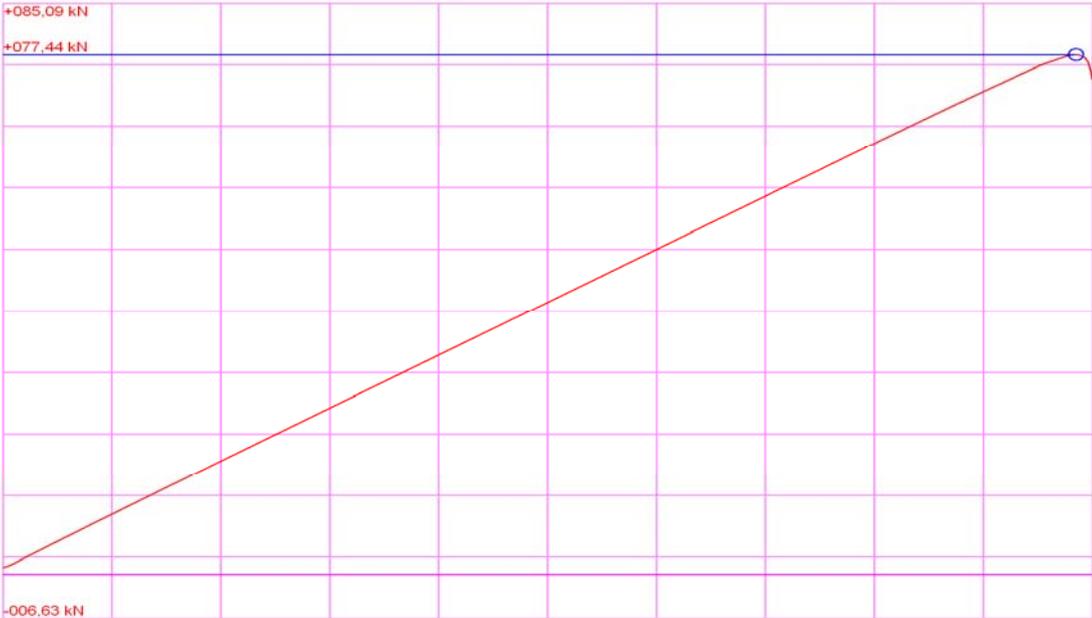
--

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE	
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)
Nº de probeta	EA9.1.a
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	09/01/2008
Fecha ensayo	16/01/2008
Edad de la probeta (Días)	7
Longitud (mm)	310
Lados (mm)	150
Refrentado	No
Peso probeta (Kg)	15,82
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,130
Carga de rotura (kN)	48,920
Tensión de rotura (MPa)	2,174
COLOCACIÓN EN LA PRENSA	
	
ROTURA DE LA PROBETA	
	
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA	
 <p>The graph displays a linear load-displacement curve for the compression test. The vertical axis represents load in kilonewtons (kN), with a maximum value of +053.71 kN and a minimum of -003.79 kN. The horizontal axis represents displacement. The curve shows a steady increase in load until it reaches a peak of +048.92 kN, after which there is a small decrease in load, indicating the failure of the specimen.</p>	

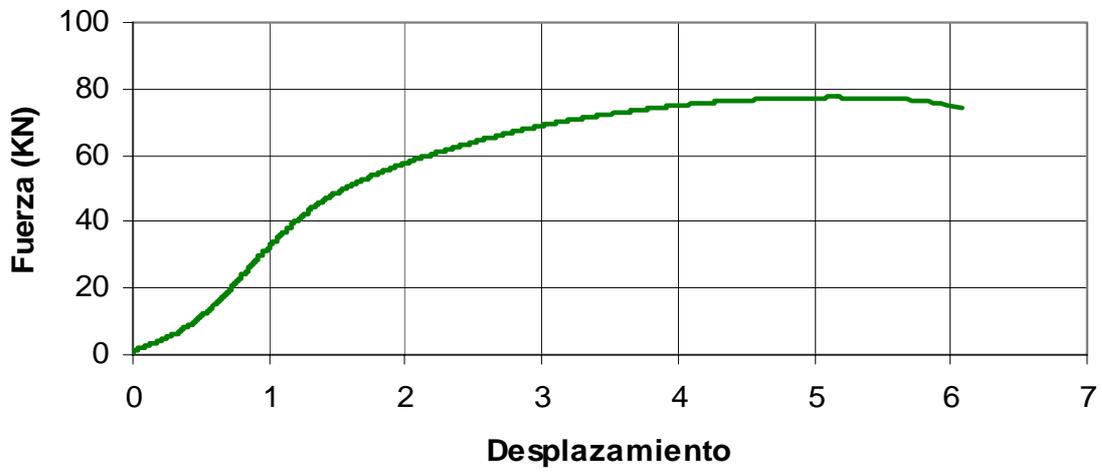


OBSERVACIONES

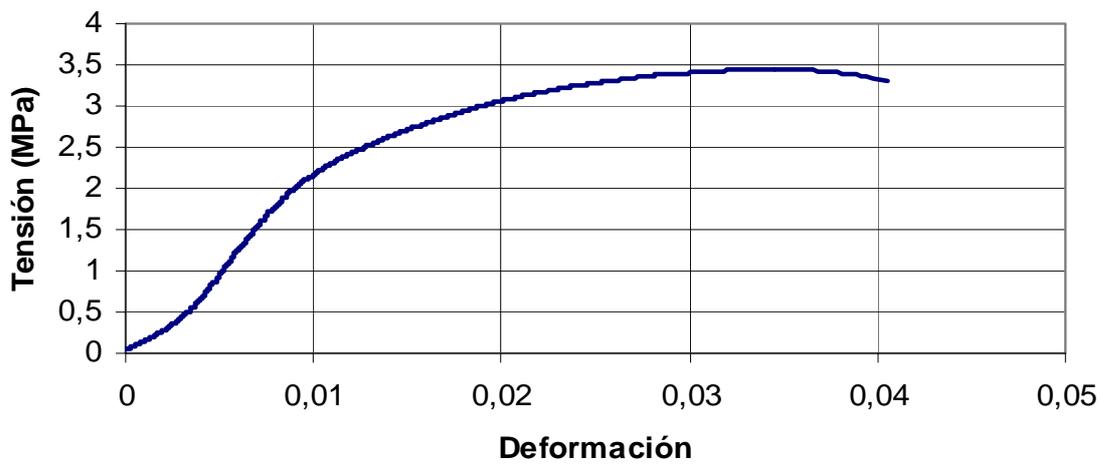
### A5.4. ROTURA A COMPRESIÓN SIMPLE DE PROBETAS A LOS 28 DÍAS

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE	
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)
Nº de probeta	EA1.1.a
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	03/01/2008
Fecha ensayo	31/01/2008
Edad de la probeta (Días)	28
Longitud (mm)	305
Lados (mm)	150
Refrentado	No
Peso probeta (Kg)	15,98
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,101
Carga de rotura (kN)	77,440
Tensión de rotura (MPa)	3,442
COLOCACIÓN EN LA PRENSA	
	
ROTURA DE LA PROBETA	
	
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA	
	

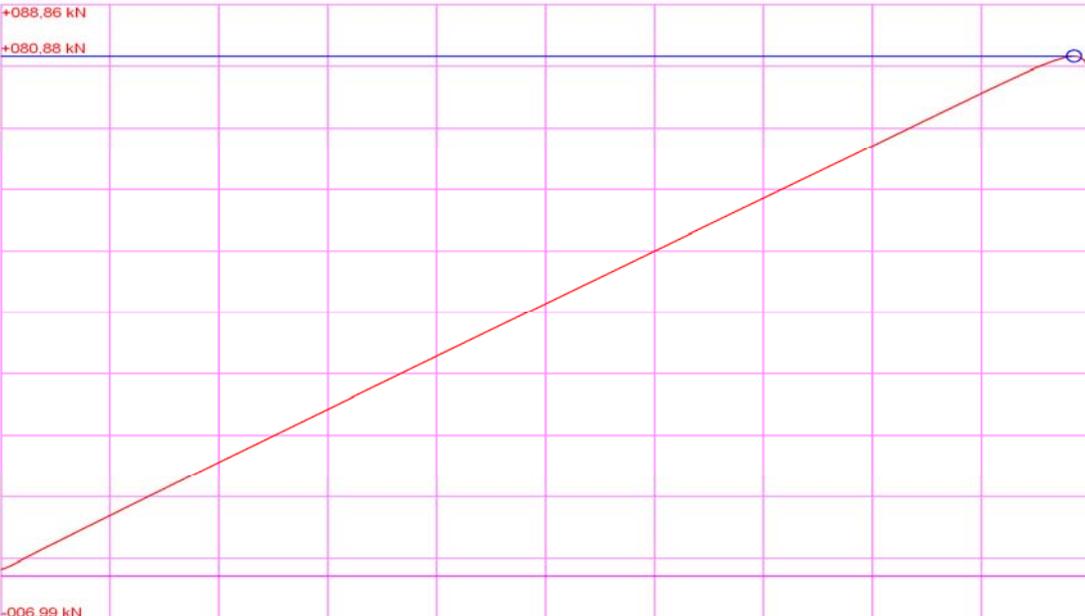
### ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE



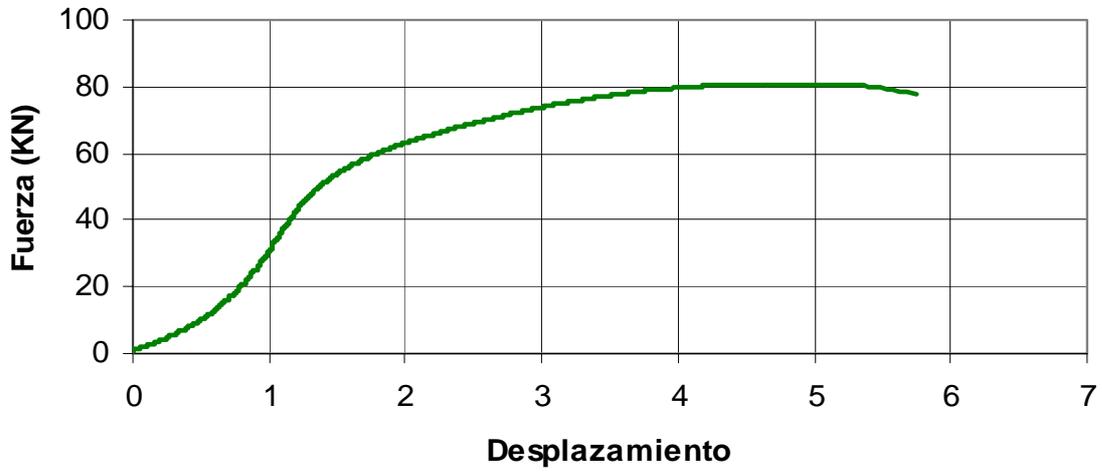
### ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE



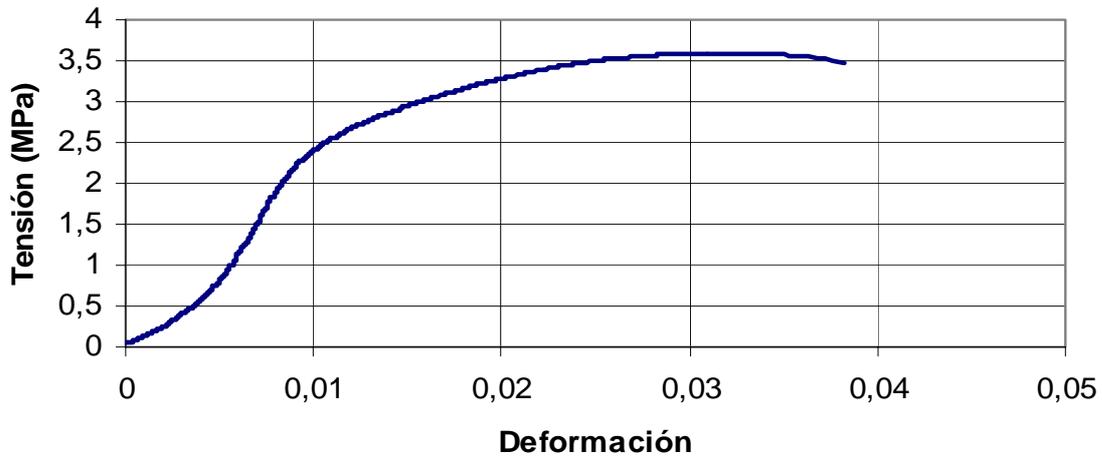
#### OBSERVACIONES

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE	
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)
Nº de probeta	EA1.2.a
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	03/01/2008
Fecha ensayo	31/01/2008
Edad de la probeta (Días)	28
Longitud (mm)	310
Lados (mm)	150
Refrentado	No
Peso probeta (Kg)	16,26
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,106
Carga de rotura (kN)	80,870
Tensión de rotura (MPa)	3,594
COLOCACIÓN EN LA PRENSA	
	
ROTURA DE LA PROBETA	
	
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA	
	

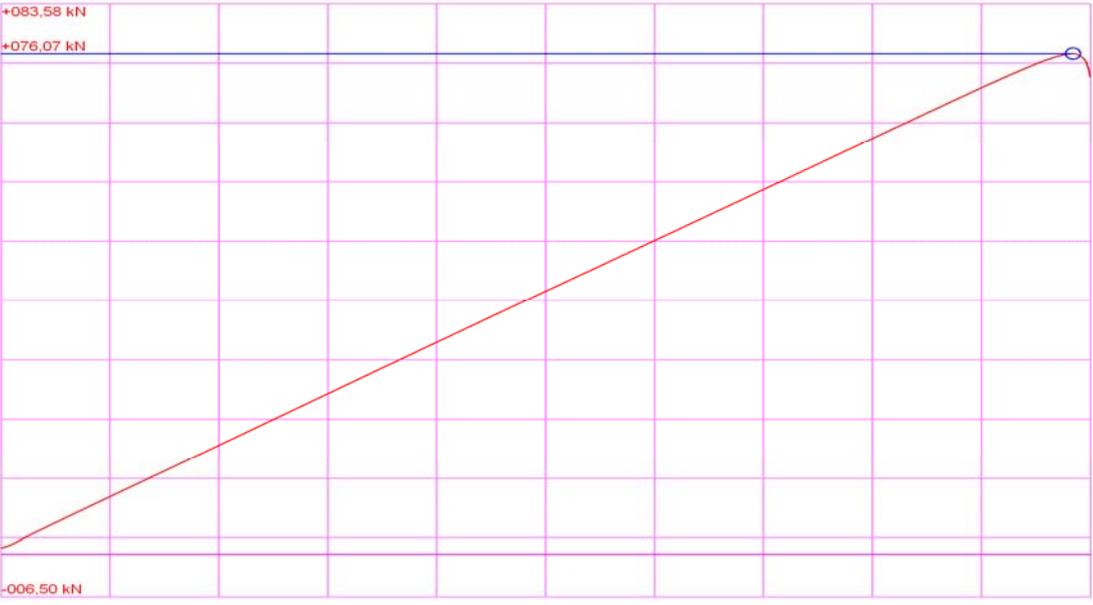
### ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE



### ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE



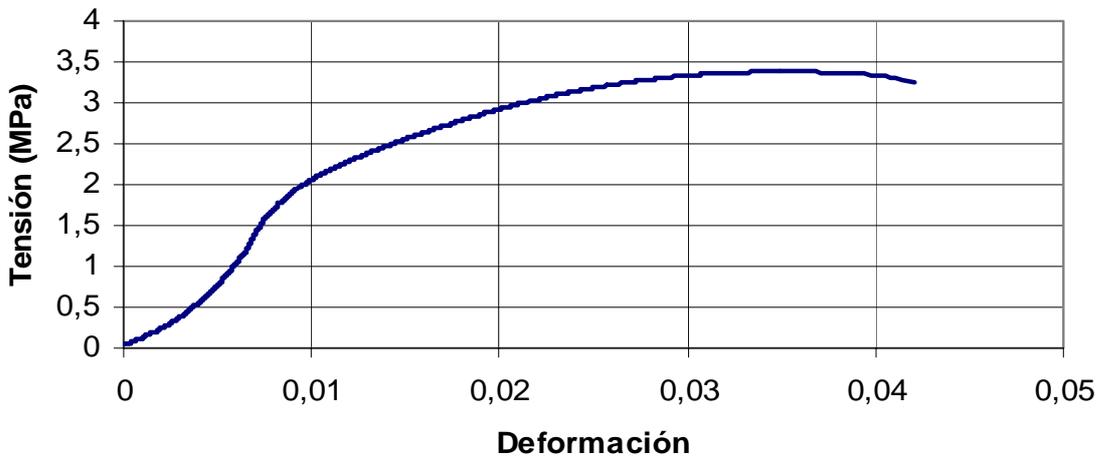
#### OBSERVACIONES

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE	
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)
Nº de probeta	EA2.1.a
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	03/01/2008
Fecha ensayo	31/01/2008
Edad de la probeta (Días)	28
Longitud (mm)	295
Lados (mm)	150
Refrentado	No
Peso probeta (Kg)	15,56
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,108
Carga de rotura (kN)	76,070
Tensión de rotura (MPa)	3,381
COLOCACIÓN EN LA PRENSA	
	
ROTURA DE LA PROBETA	
	
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA	
	

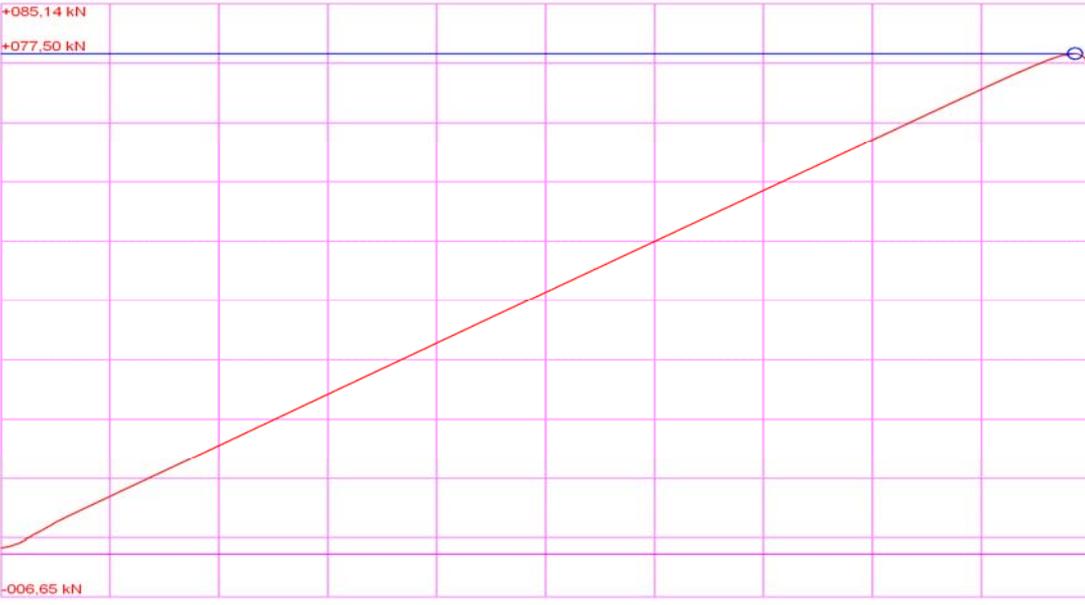
### ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE



### ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE



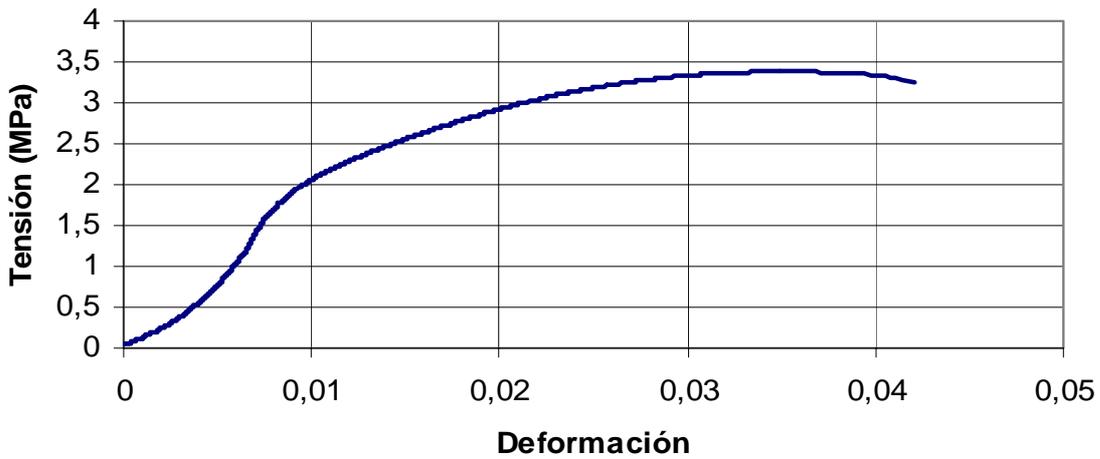
#### OBSERVACIONES

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE	
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)
Nº de probeta	EA2.2.a
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	03/01/2008
Fecha ensayo	31/01/2008
Edad de la probeta (Días)	28
Longitud (mm)	320
Lados (mm)	150
Refrentado	No
Peso probeta (Kg)	17,38
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,125
Carga de rotura (kN)	77,490
Tensión de rotura (MPa)	3,444
COLOCACIÓN EN LA PRENSA	
	
ROTURA DE LA PROBETA	
	
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA	
	

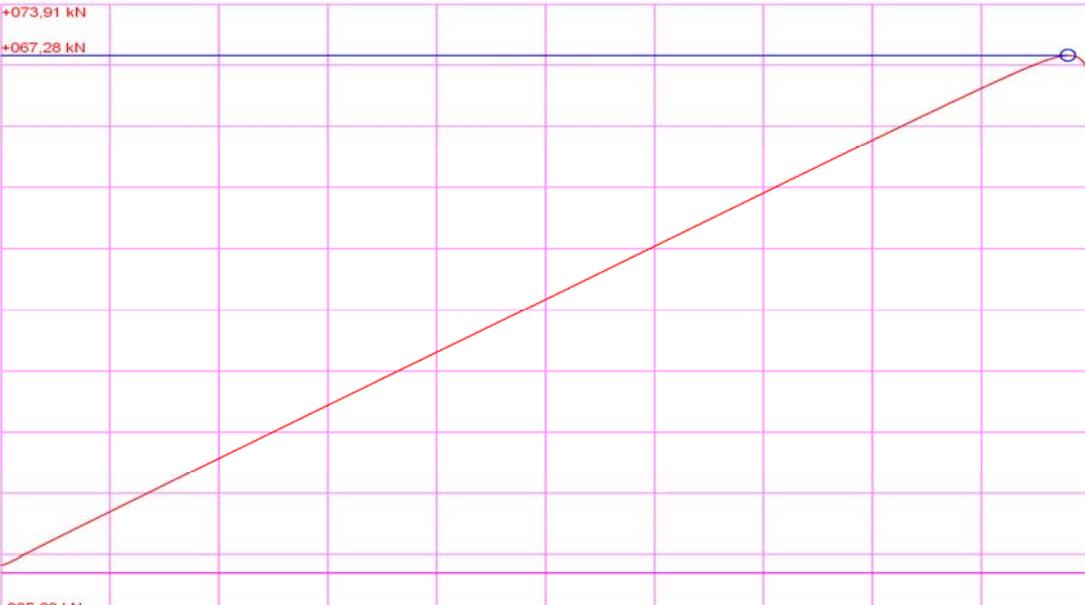
### ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE



### ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE



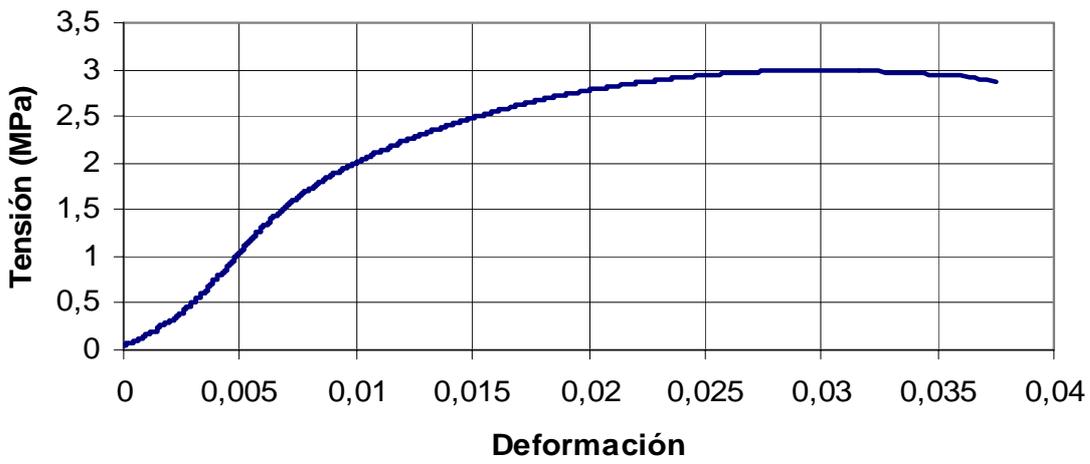
#### OBSERVACIONES

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE	
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)
Nº de probeta	EA3.1.a
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	03/01/2008
Fecha ensayo	31/01/2008
Edad de la probeta (Días)	28
Longitud (mm)	300
Lados (mm)	150
Refrentado	No
Peso probeta (Kg)	15,32
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,099
Carga de rotura (kN)	67,280
Tensión de rotura (MPa)	2,990
COLOCACIÓN EN LA PRENSA	
	
ROTURA DE LA PROBETA	
	
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA	
 <p>The graph displays a load-displacement curve on a grid. The vertical axis represents load in kN, with a maximum value of +073.91 kN and a minimum value of -005.63 kN. The horizontal axis represents displacement. The curve starts at the origin, rises linearly to a peak load of +067.28 kN, and then exhibits a slight post-peak softening, ending at a load of -005.63 kN.</p>	

### ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE

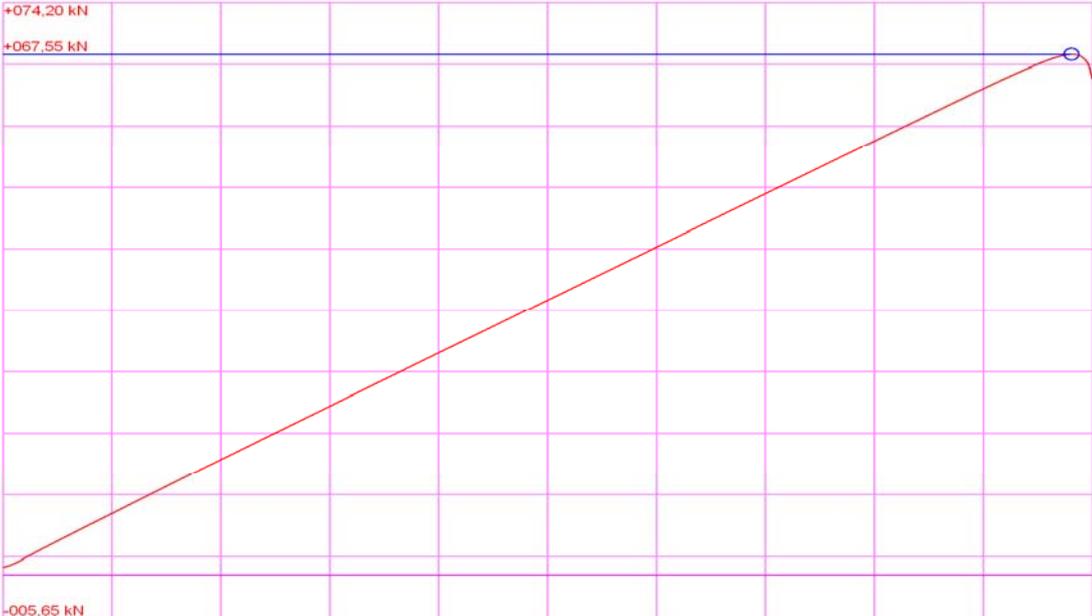


### ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE



OBSERVACIONES

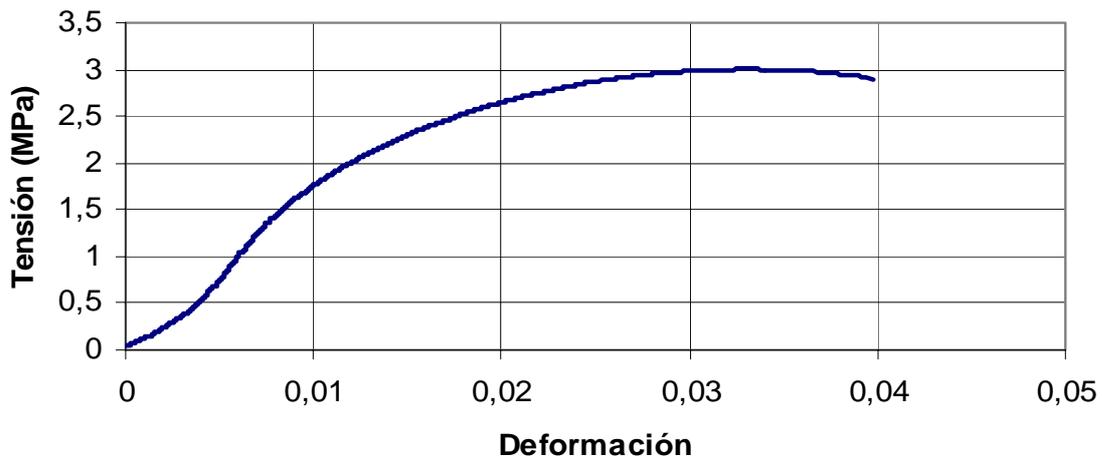
--

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE	
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)
Nº de probeta	EA3.2.a
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	03/01/2008
Fecha ensayo	31/01/2008
Edad de la probeta (Días)	28
Longitud (mm)	310
Lados (mm)	150
Refrentado	No
Peso probeta (Kg)	16,34
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,084
Carga de rotura (kN)	67,550
Tensión de rotura (MPa)	3,002
COLOCACIÓN EN LA PRENSA	
	
ROTURA DE LA PROBETA	
	
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA	
	

### ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE

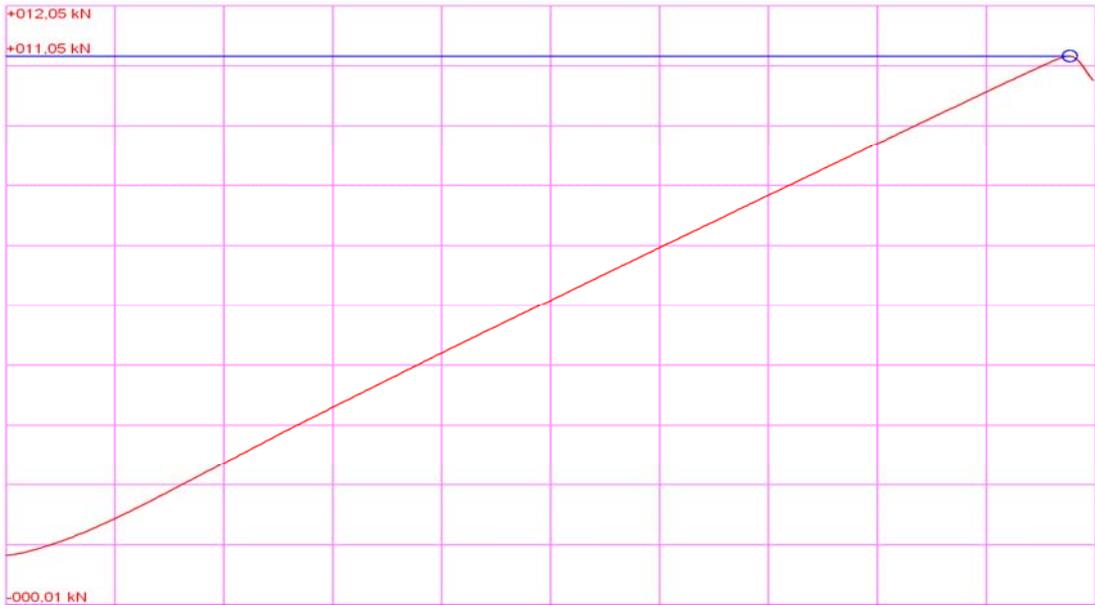


### ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE

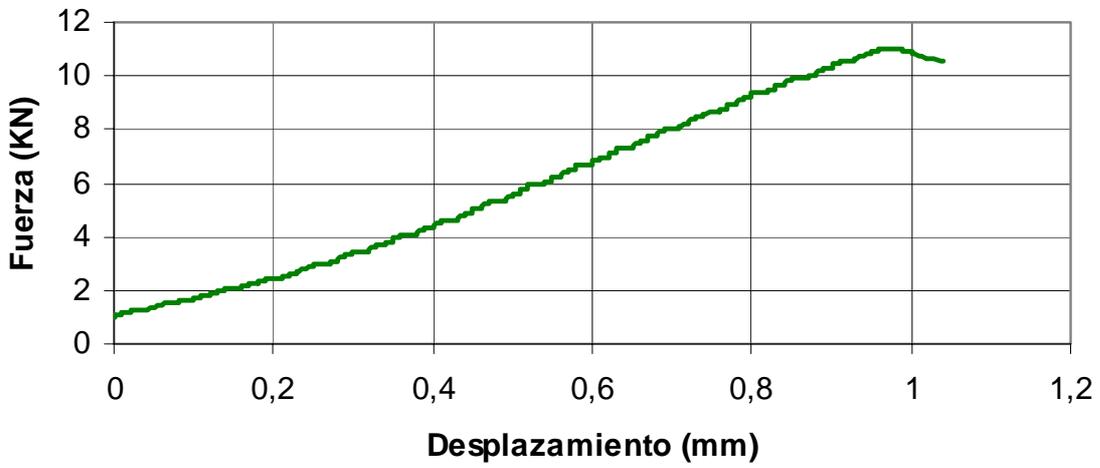


OBSERVACIONES

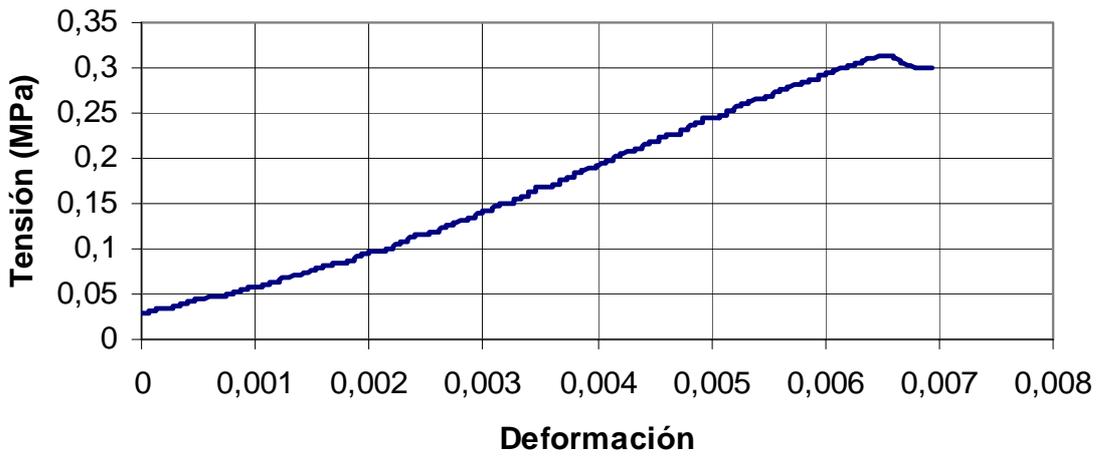
### A5.5. ROTURA A TRACCIÓN INDIRECTA DE PROBETAS A LOS 7 DÍAS

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)
Nº de probeta	EA4.1.b
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	08/15/2008
Fecha ensayo	15/01/2008
Edad de la probeta (Días)	7
Longitud (mm)	230
Lados (mm)	150
Refrentado	No
Peso probeta (Kg)	12,34
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,076
Carga de rotura (kN)	11,050
Tensión de rotura (MPa)	0,313
COLOCACIÓN EN LA PRENSA	ROTURA DE LA PROBETA
	
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA	
 <p>The graph displays a linear load-displacement curve. The vertical axis represents load in kN, with a scale from -000.01 to +012.05. The horizontal axis represents displacement. The curve starts at the origin, rises linearly to a peak load of +011.05 kN, and then exhibits a sharp drop, indicating failure. A blue circle marks the peak of the curve.</p>	

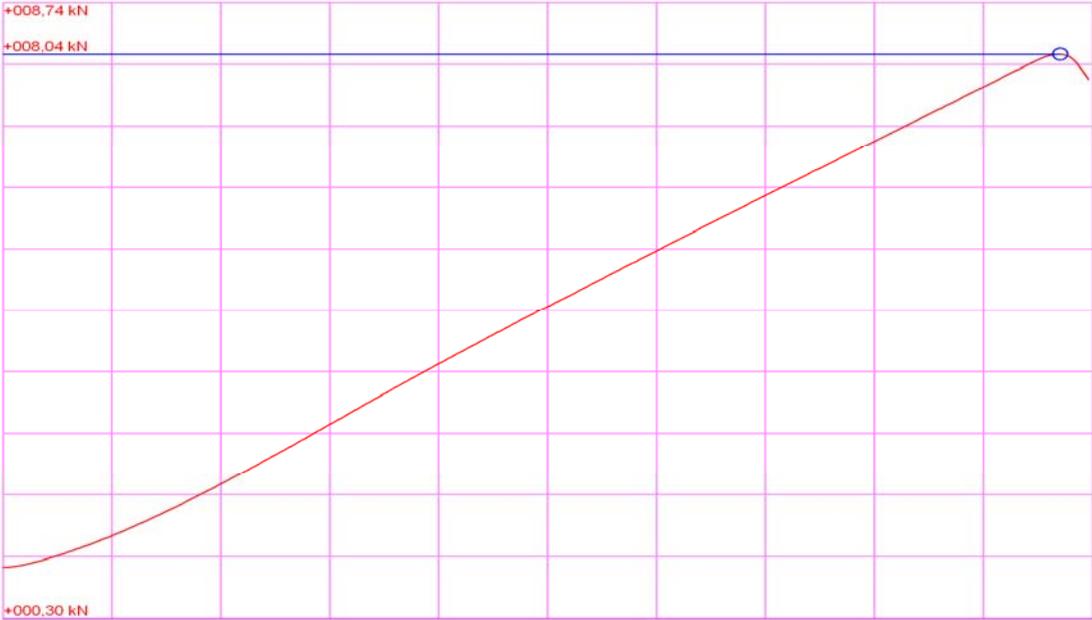
### ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA



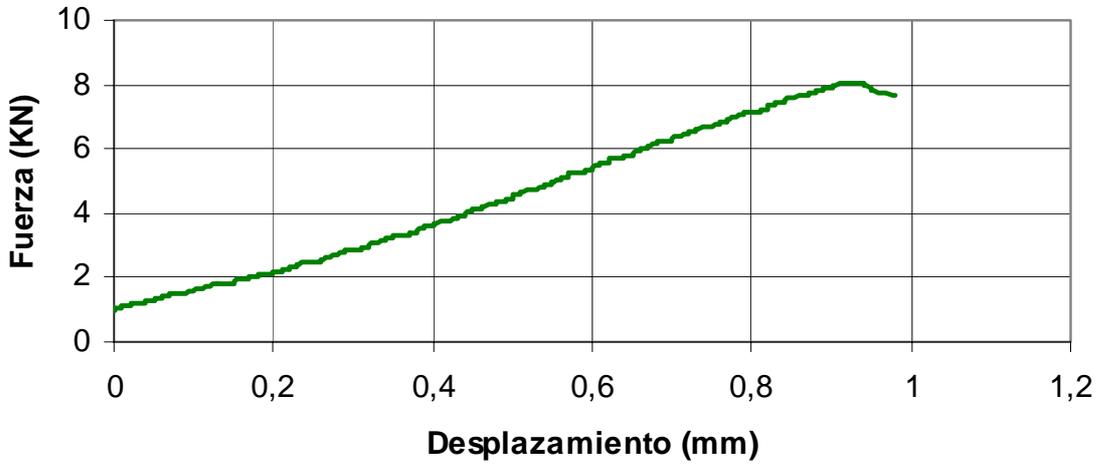
### ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA



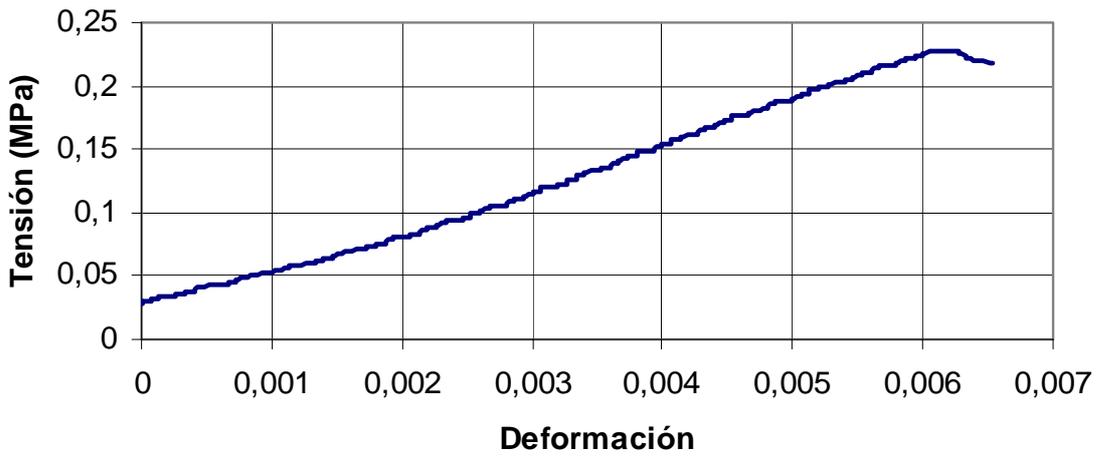
#### OBSERVACIONES

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)
Nº de probeta	EA5.1.b
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	08/15/2008
Fecha ensayo	15/01/2008
Edad de la probeta (Días)	7
Longitud (mm)	220
Lados (mm)	150
Refrentado	No
Peso probeta (Kg)	11,48
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,080
Carga de rotura (kN)	8,040
Tensión de rotura (MPa)	0,227
COLOCACIÓN EN LA PRENSA	
	
ROTURA DE LA PROBETA	
	
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA	
	

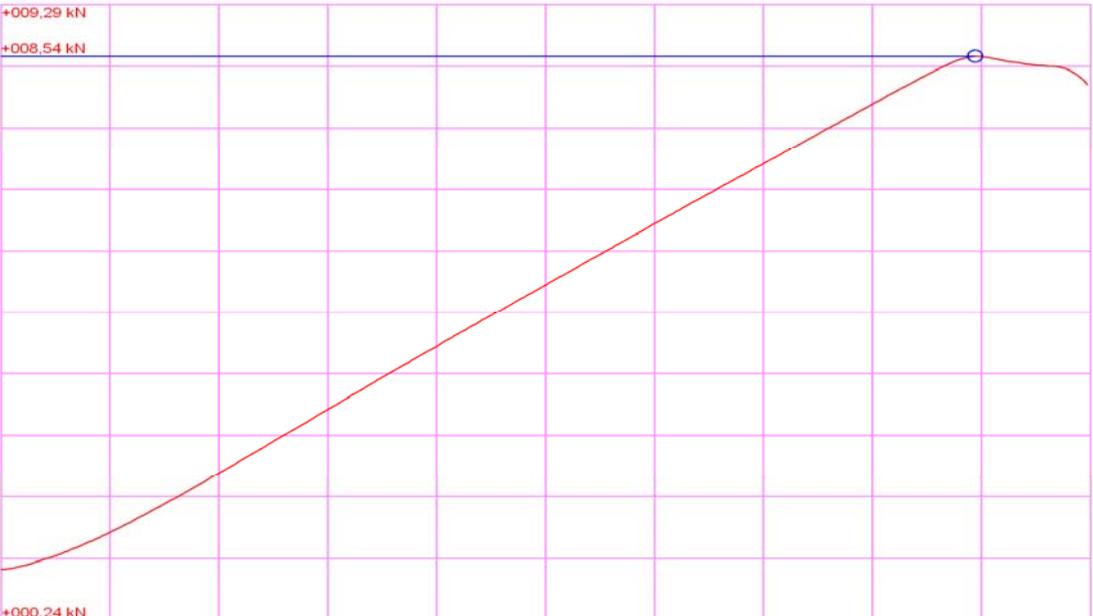
### ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA



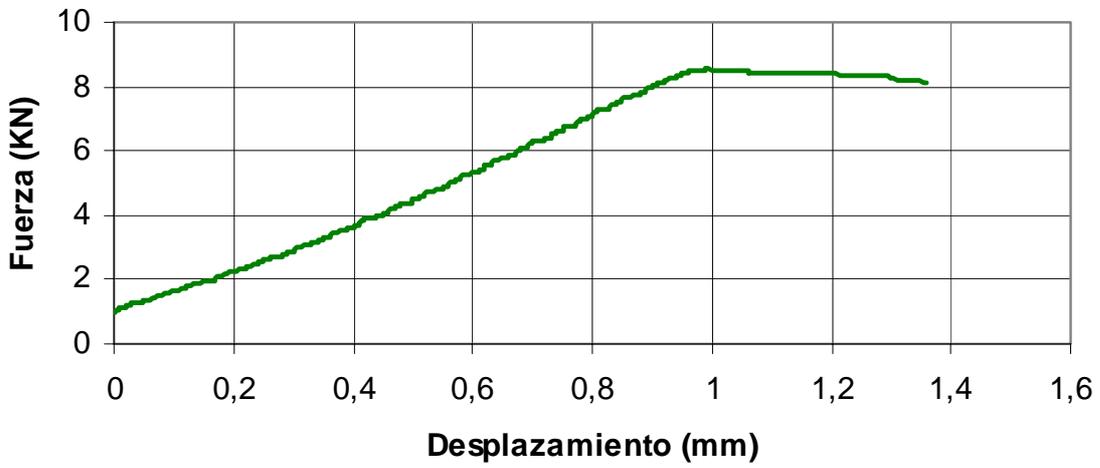
### ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA



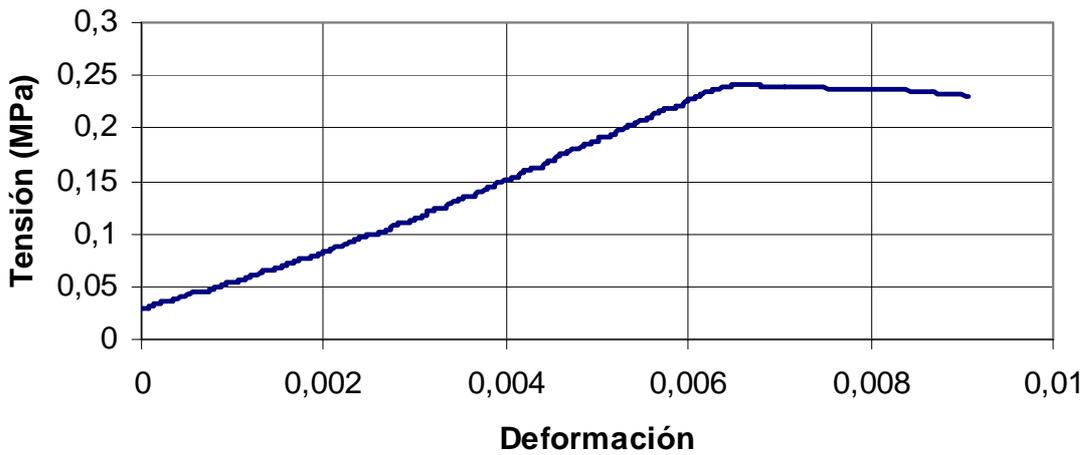
#### OBSERVACIONES

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)
Nº de probeta	EA6.1.b
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	08/15/2008
Fecha ensayo	15/01/2008
Edad de la probeta (Días)	7
Longitud (mm)	250
Lados (mm)	150
Refrentado	No
Peso probeta (Kg)	12,24
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,042
Carga de rotura (kN)	8,540
Tensión de rotura (MPa)	0,242
COLOCACIÓN EN LA PRENSA	
	
ROTURA DE LA PROBETA	
	
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA	
	

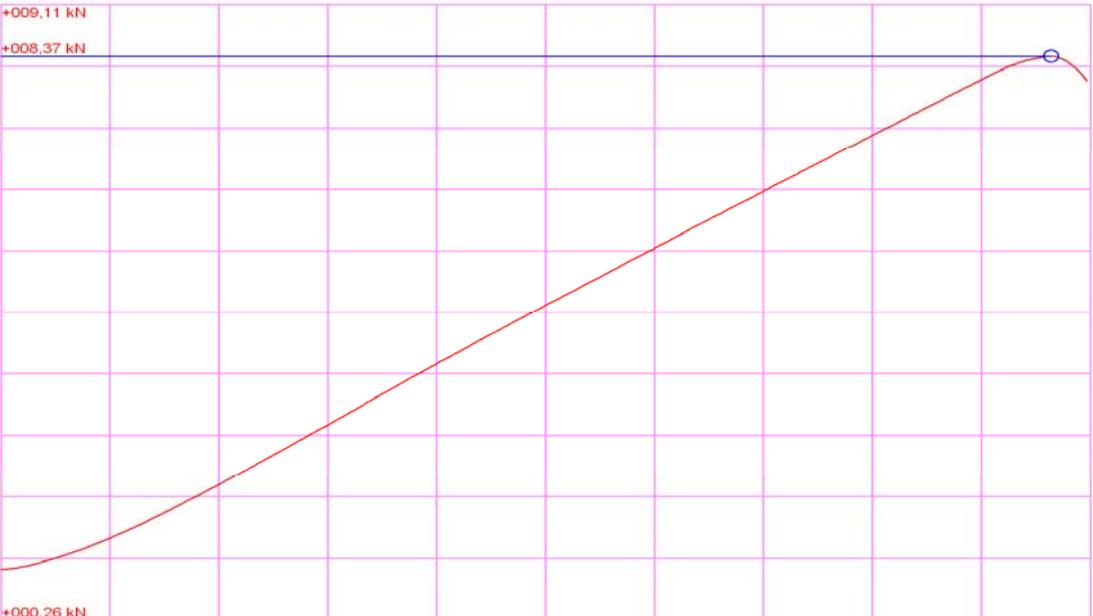
### ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA



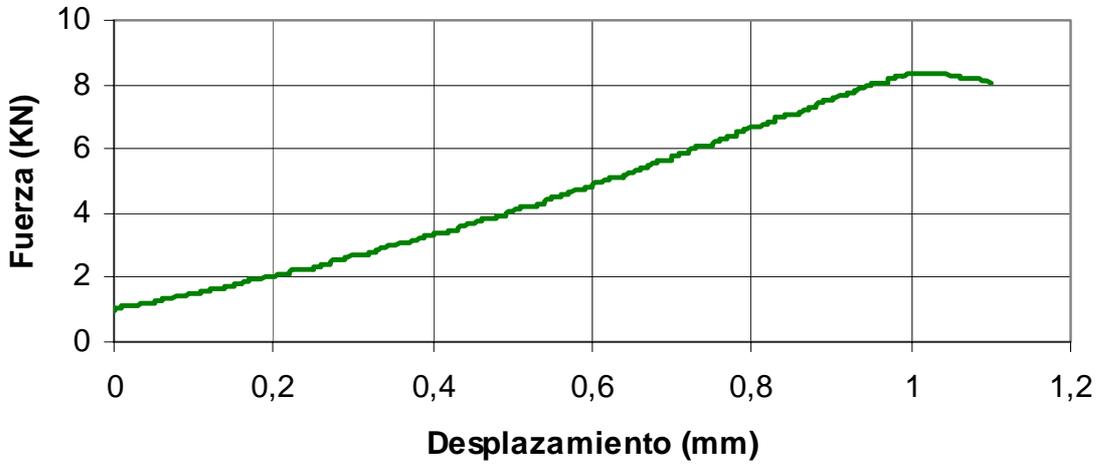
### ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA



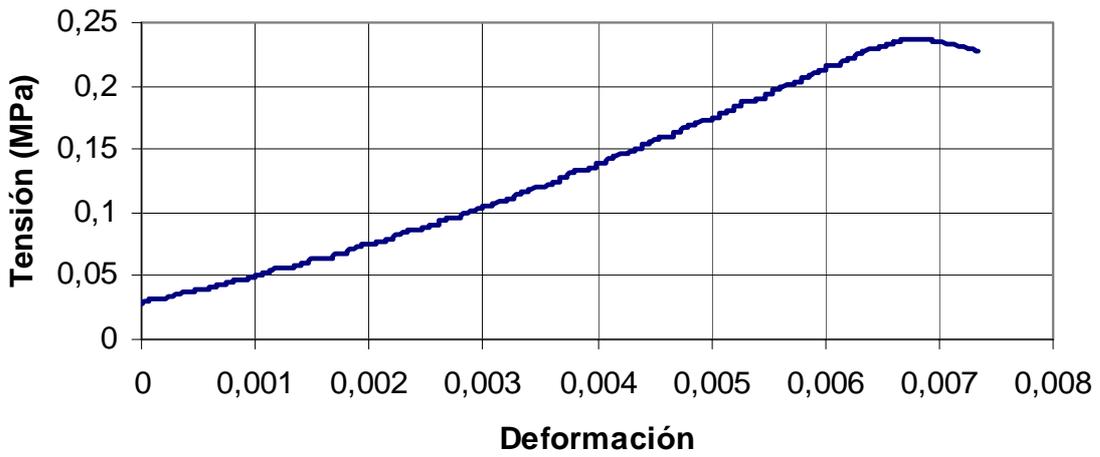
#### OBSERVACIONES

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)
Nº de probeta	EA7.1.b
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	09/15/2008
Fecha ensayo	16/01/2008
Edad de la probeta (Días)	7
Longitud (mm)	285
Lados (mm)	150
Refrentado	No
Peso probeta (Kg)	14,60
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,124
Carga de rotura (kN)	8,370
Tensión de rotura (MPa)	0,237
COLOCACIÓN EN LA PRENSA	
	
ROTURA DE LA PROBETA	
	
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA	
	

### ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

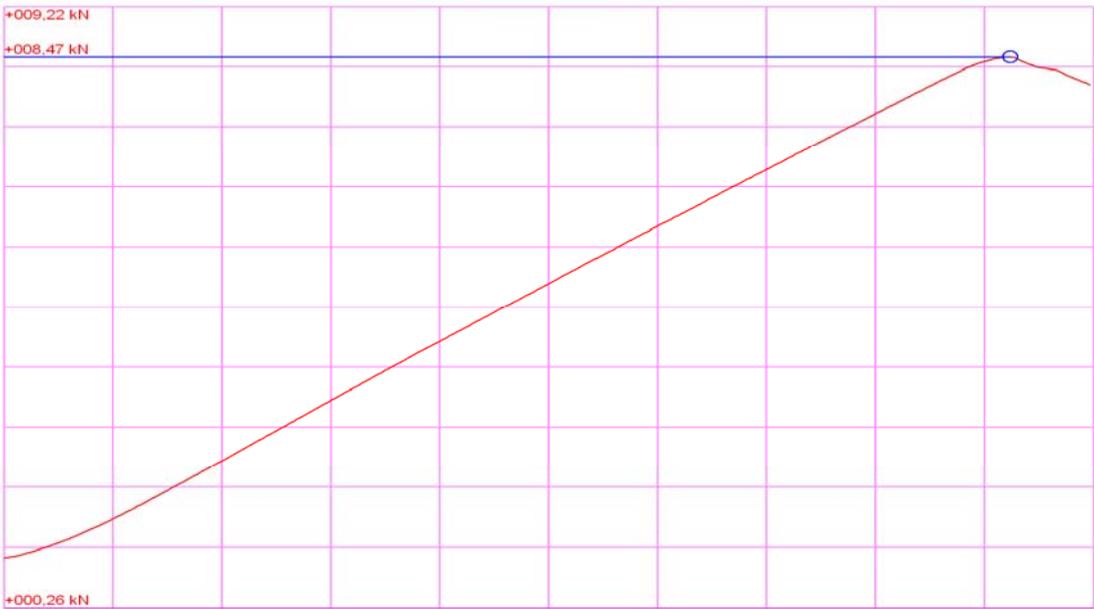


### ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

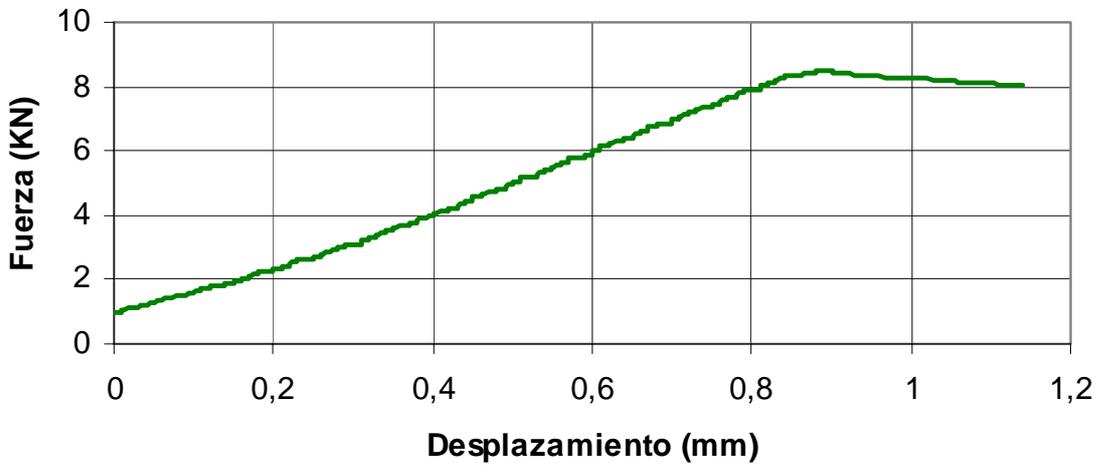


OBSERVACIONES

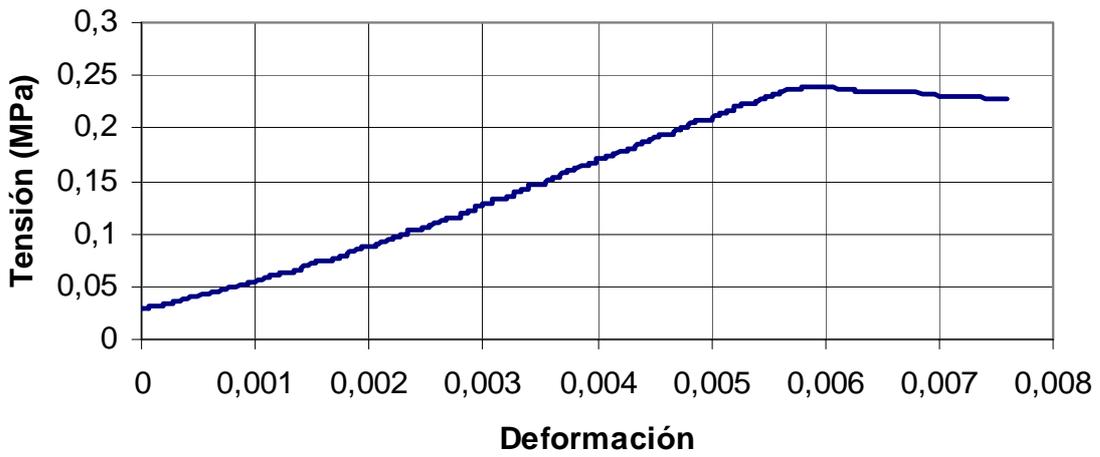
--

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)
Nº de probeta	EA8.1.b
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	09/15/2008
Fecha ensayo	16/01/2008
Edad de la probeta (Días)	7
Longitud (mm)	275
Lados (mm)	150
Refrentado	No
Peso probeta (Kg)	14,34
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,094
Carga de rotura (kN)	8,470
Tensión de rotura (MPa)	0,240
COLOCACIÓN EN LA PRENSA	ROTURA DE LA PROBETA
	
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA	
 <p>The graph displays a load-displacement curve for the indirect tensile test. The vertical axis represents load in kilonewtons (kN), with marked values at +000.26 kN, +008.47 kN, and +009.22 kN. The curve shows a linear relationship between load and displacement up to the peak load of 8.47 kN, after which it exhibits a slight downward slope, indicating post-peak behavior. A blue circle marks the peak of the curve.</p>	

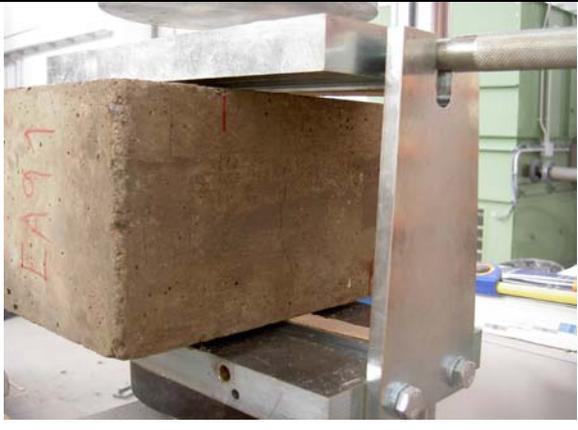
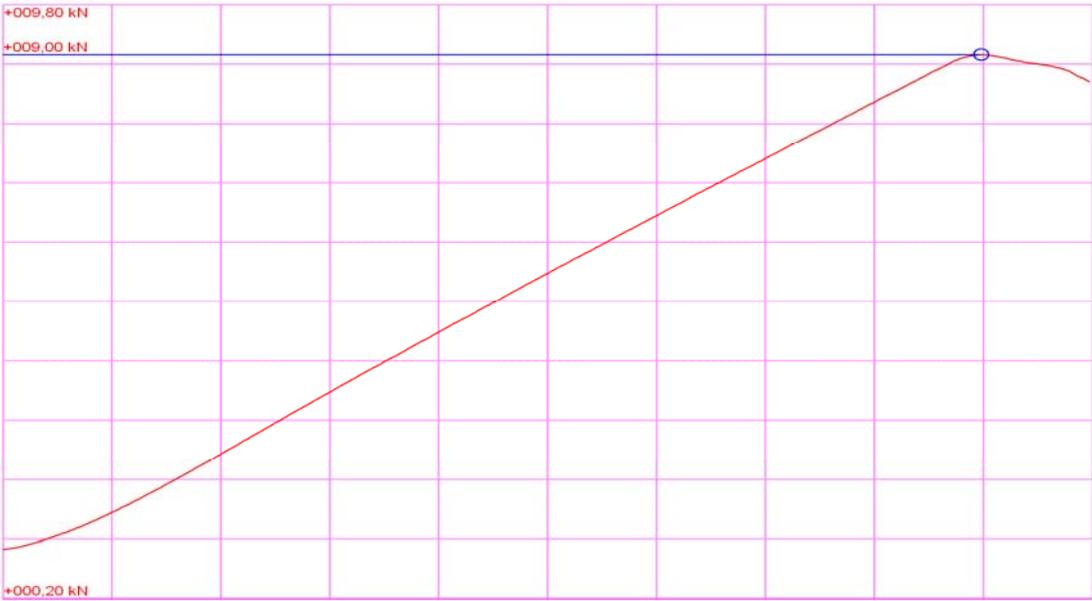
### ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA



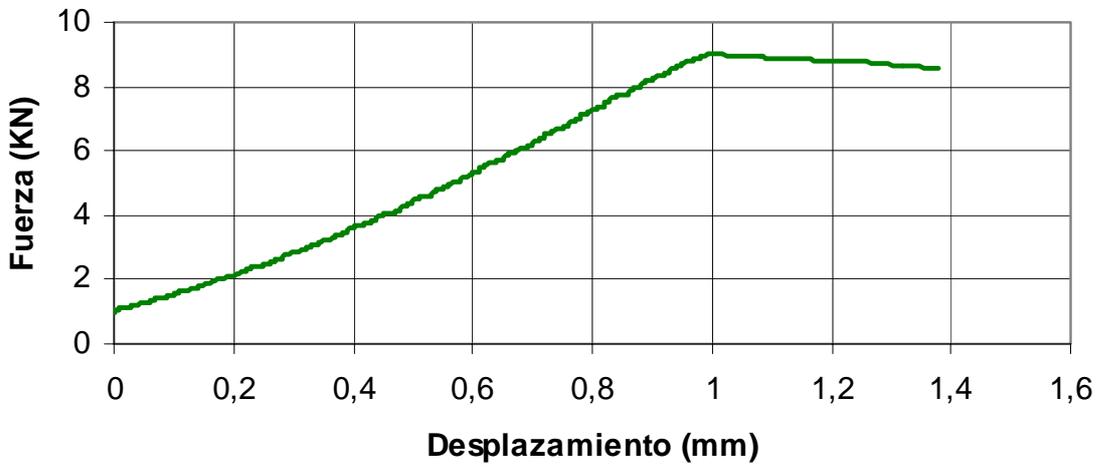
### ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA



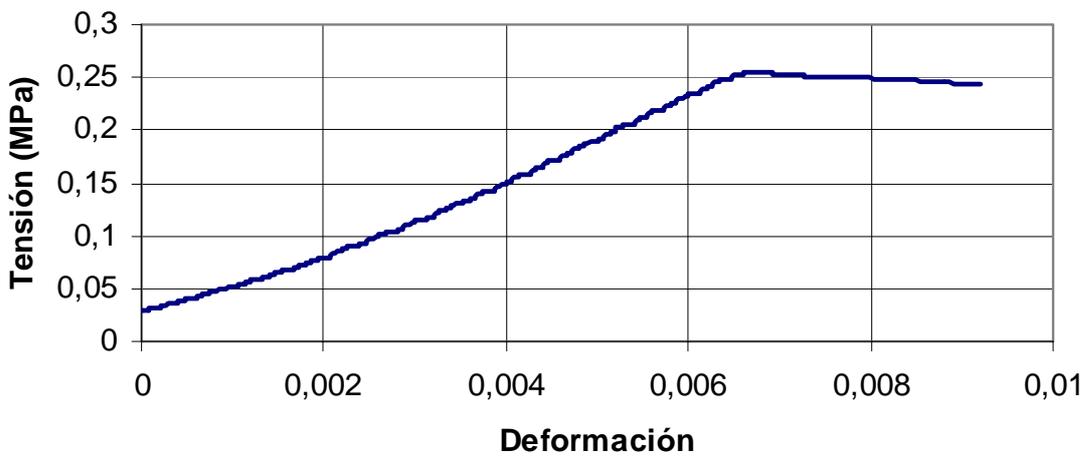
#### OBSERVACIONES

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)
Nº de probeta	EA9.1.b
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	09/15/2008
Fecha ensayo	16/01/2008
Edad de la probeta (Días)	7
Longitud (mm)	265
Lados (mm)	150
Refrentado	No
Peso probeta (Kg)	14,78
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,130
Carga de rotura (kN)	9,000
Tensión de rotura (MPa)	0,255
COLOCACIÓN EN LA PRENSA	
	
ROTURA DE LA PROBETA	
	
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA	
	

### ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

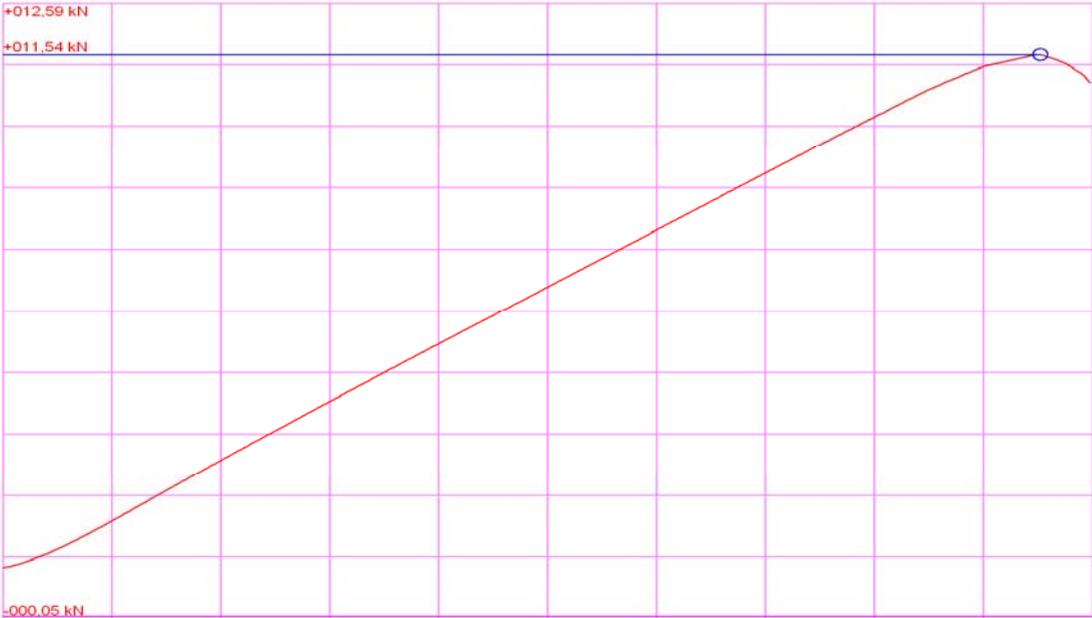


### ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

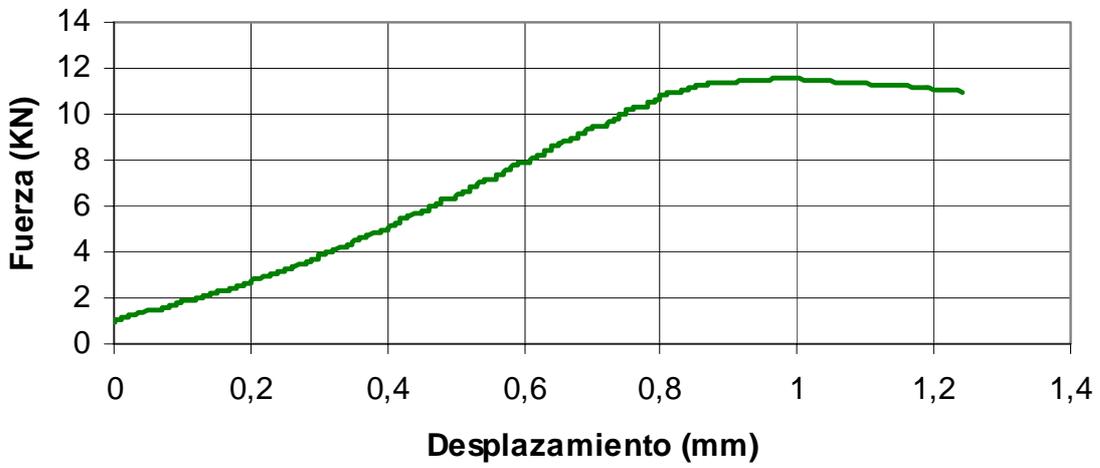


OBSERVACIONES

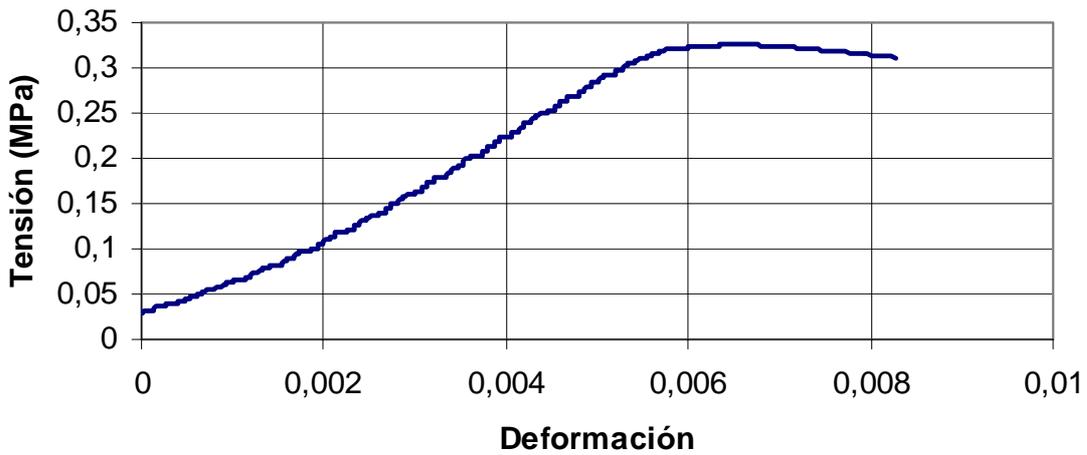
### A5.6. ROTURA A TRACCIÓN INDIRECTA DE PROBETAS A LOS 28 DÍAS

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)
Nº de probeta	EA1.1.b
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	03/01/2008
Fecha ensayo	31/01/2008
Edad de la probeta (Días)	28
Longitud (mm)	260
Lados (mm)	150
Refrentado	No
Peso probeta (Kg)	13,92
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,101
Carga de rotura (kN)	11,540
Tensión de rotura (MPa)	0,327
COLOCACIÓN EN LA PRENSA	
	
ROTURA DE LA PROBETA	
	
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA	
	

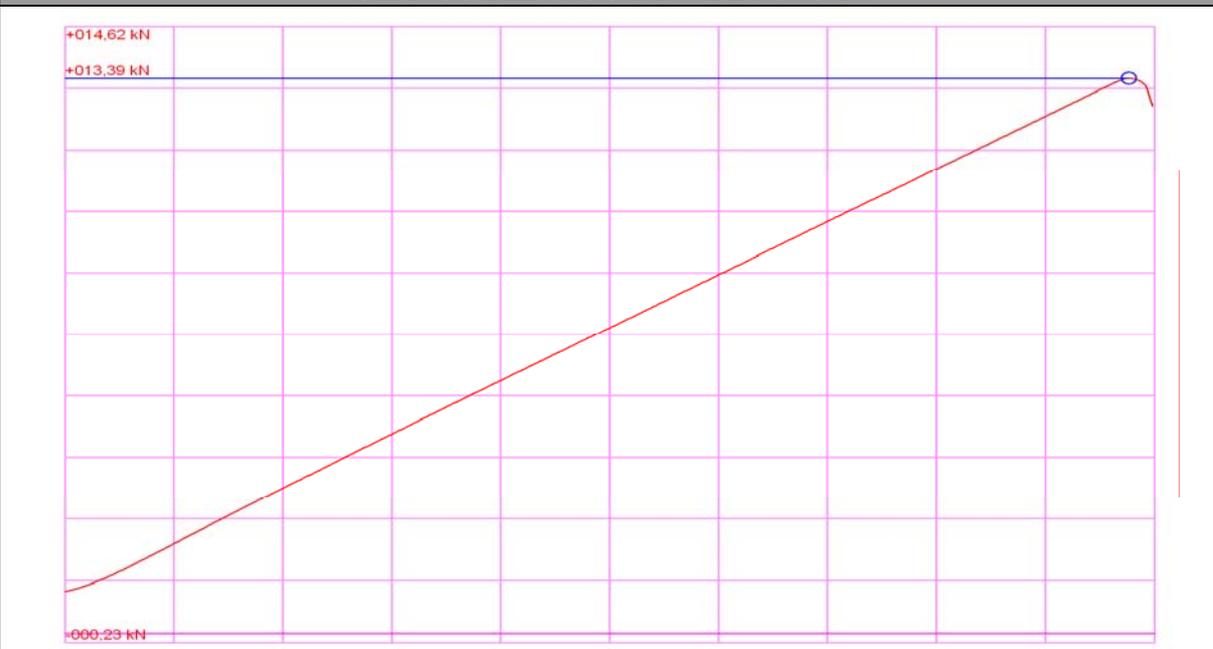
### ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA



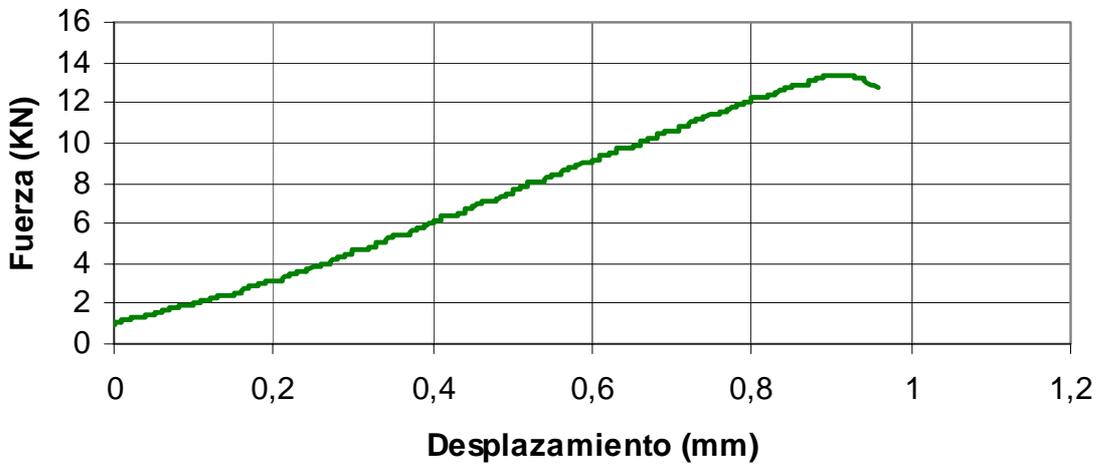
### ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA



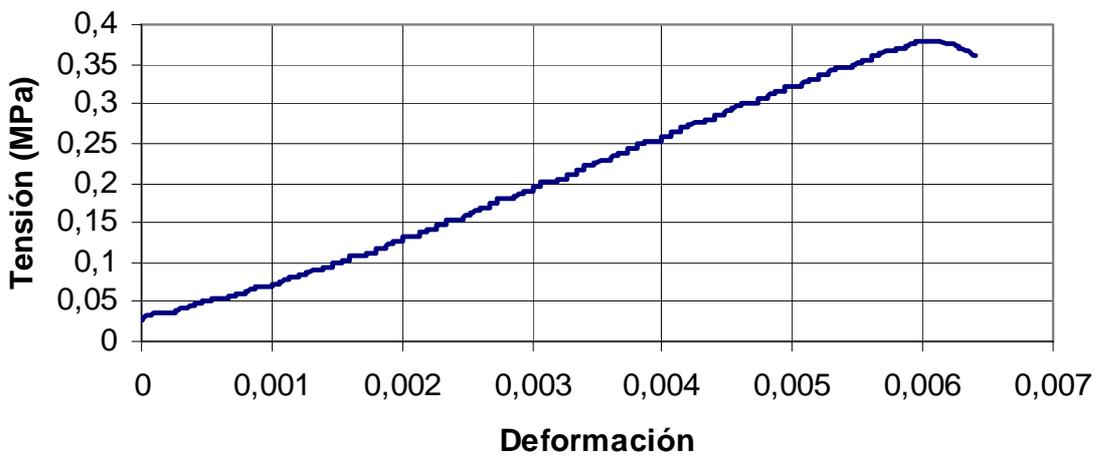
#### OBSERVACIONES

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)
Nº de probeta	EA1.2.b
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	03/01/2008
Fecha ensayo	31/01/2008
Edad de la probeta (Días)	28
Longitud (mm)	260
Lados (mm)	150
Refrentado	No
Peso probeta (Kg)	13,84
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,106
Carga de rotura (kN)	13,390
Tensión de rotura (MPa)	0,379
COLOCACIÓN EN LA PRENSA	
	
ROTURA DE LA PROBETA	
	
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA	
	

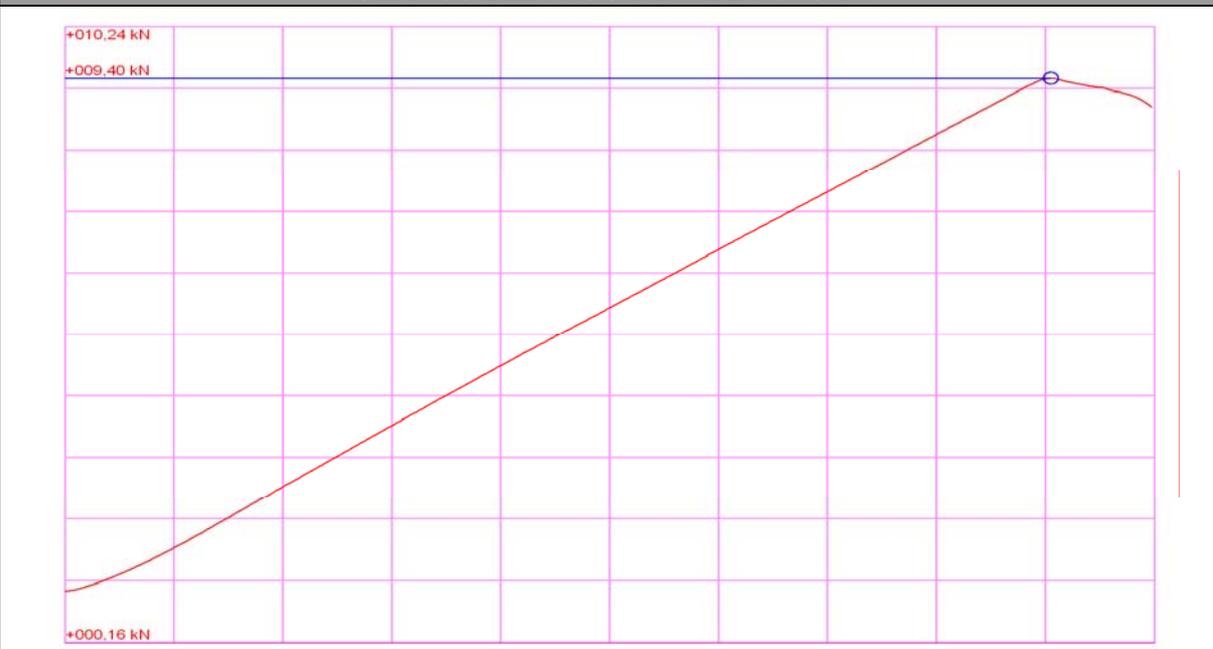
### ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA



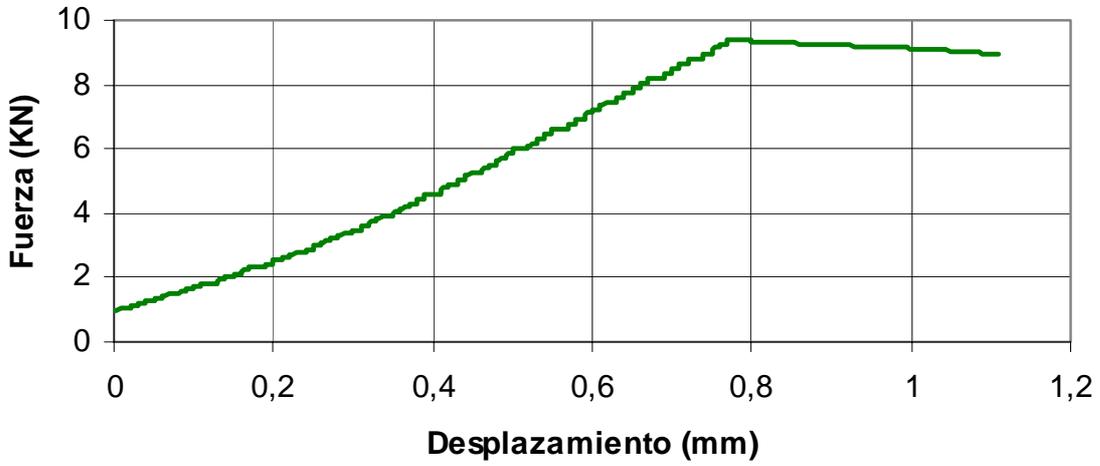
### ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA



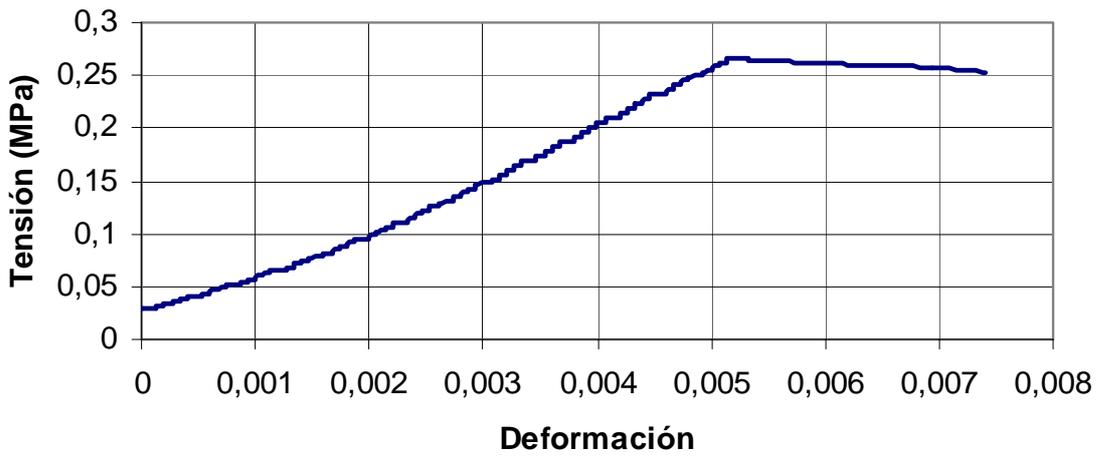
#### OBSERVACIONES

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)
Nº de probeta	EA2.1.b
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	03/01/2008
Fecha ensayo	31/01/2008
Edad de la probeta (Días)	28
Longitud (mm)	275
Lados (mm)	150
Refrentado	No
Peso probeta (Kg)	14,34
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,108
Carga de rotura (kN)	9,400
Tensión de rotura (MPa)	0,266
COLOCACIÓN EN LA PRENSA	
	
ROTURA DE LA PROBETA	
	
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA	
	

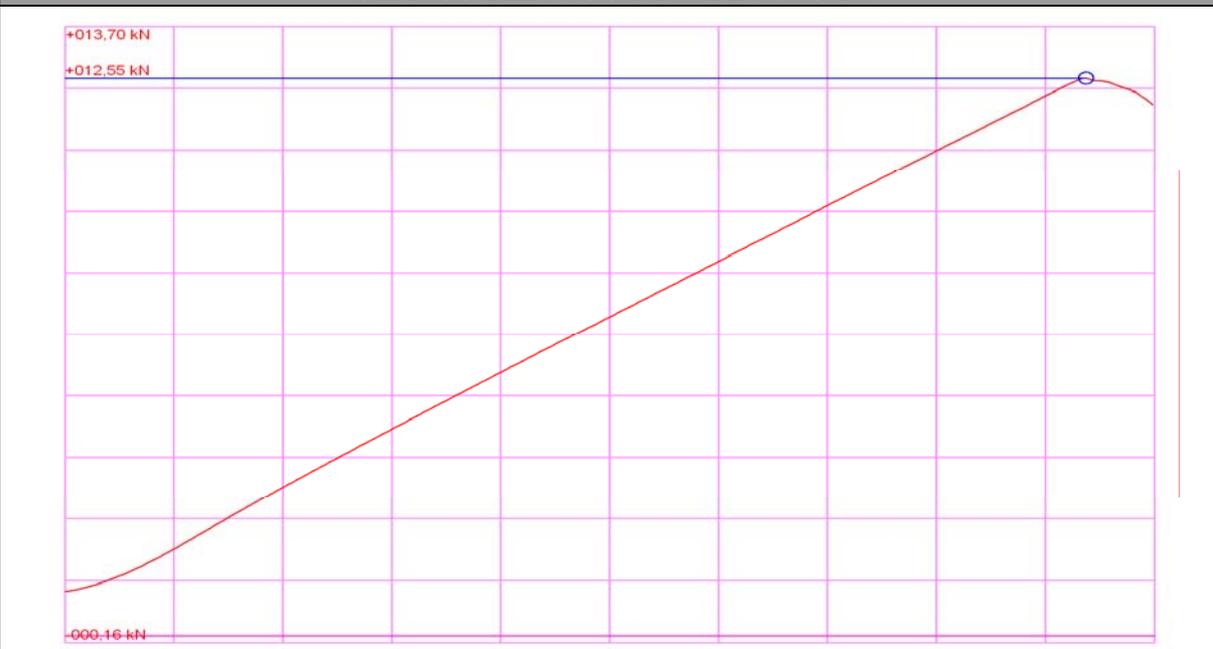
### ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA



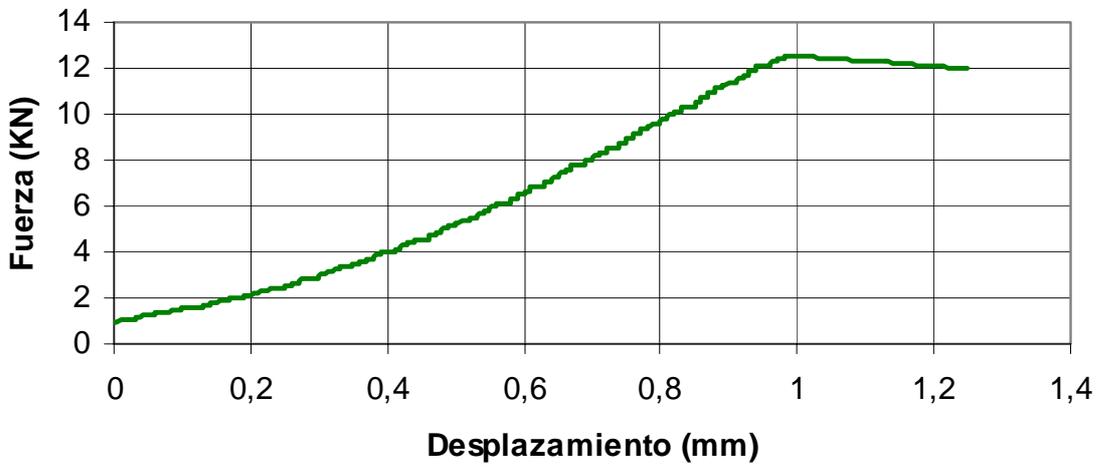
### ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA



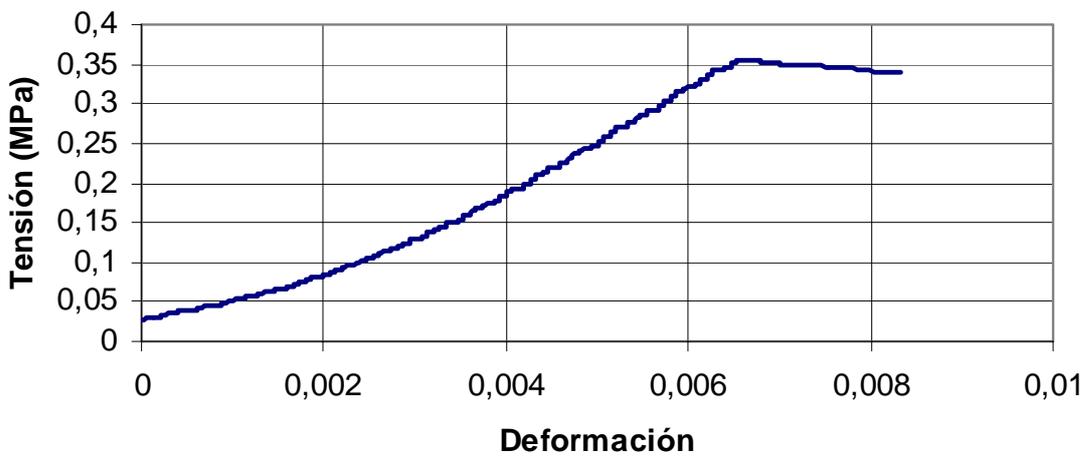
#### OBSERVACIONES

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)
Nº de probeta	EA2.2.b
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	03/01/2008
Fecha ensayo	31/01/2008
Edad de la probeta (Días)	28
Longitud (mm)	235
Lados (mm)	150
Refrentado	No
Peso probeta (Kg)	13,1
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,125
Carga de rotura (kN)	12,550
Tensión de rotura (MPa)	0,355
COLOCACIÓN EN LA PRENSA	
	
ROTURA DE LA PROBETA	
	

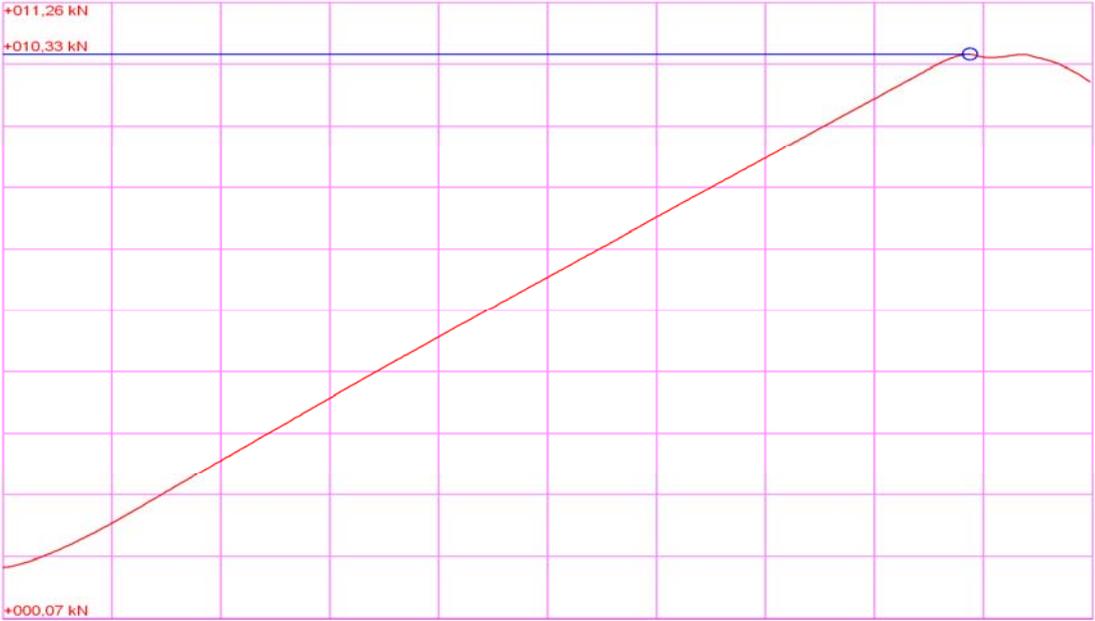
### ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA



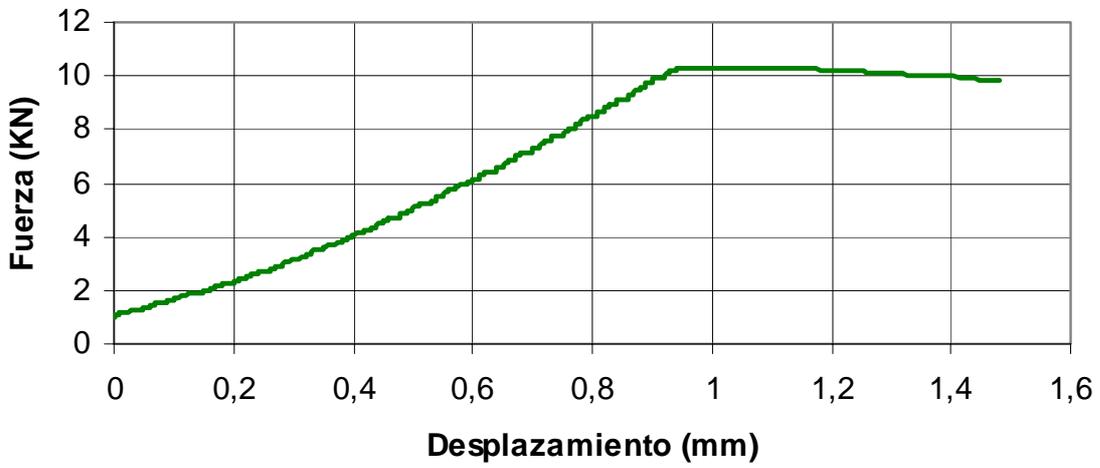
### ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA



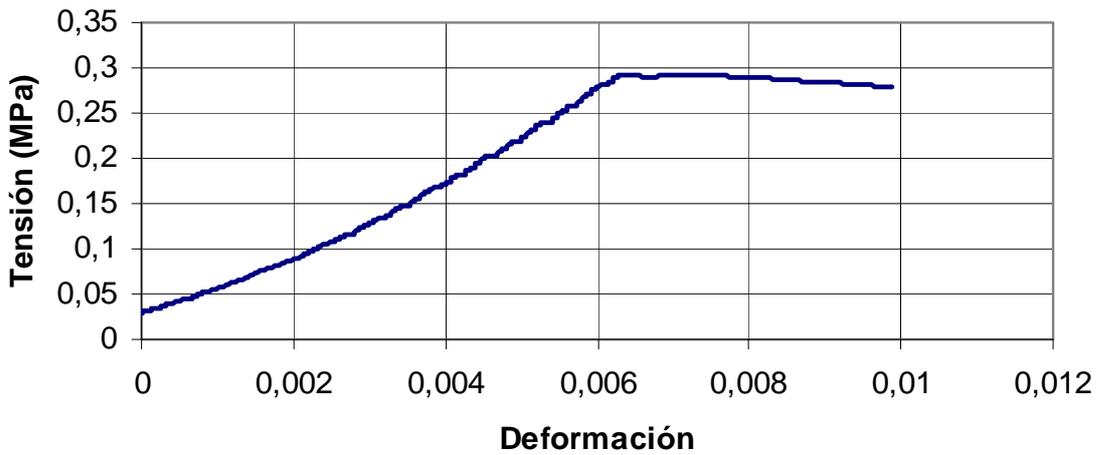
#### OBSERVACIONES

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)
Nº de probeta	EA3.1.b
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	03/01/2008
Fecha ensayo	31/01/2008
Edad de la probeta (Días)	28
Longitud (mm)	280
Lados (mm)	150
Refrentado	No
Peso probeta (Kg)	14,5
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,099
Carga de rotura (kN)	10,35
Tensión de rotura (MPa)	0,292
COLOCACIÓN EN LA PRENSA	
	
ROTURA DE LA PROBETA	
	
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA	
	

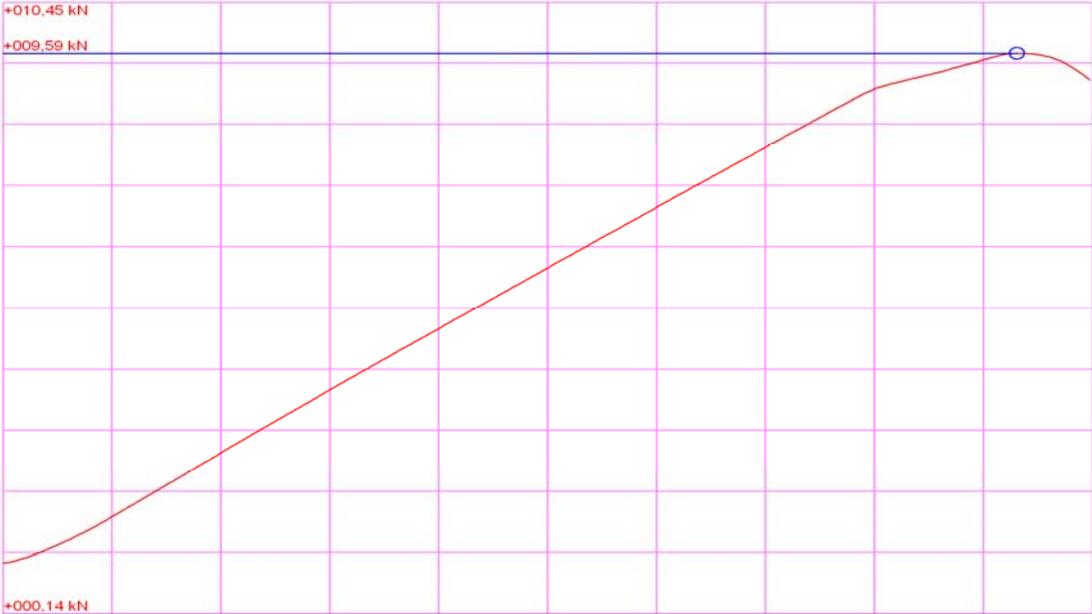
### ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA



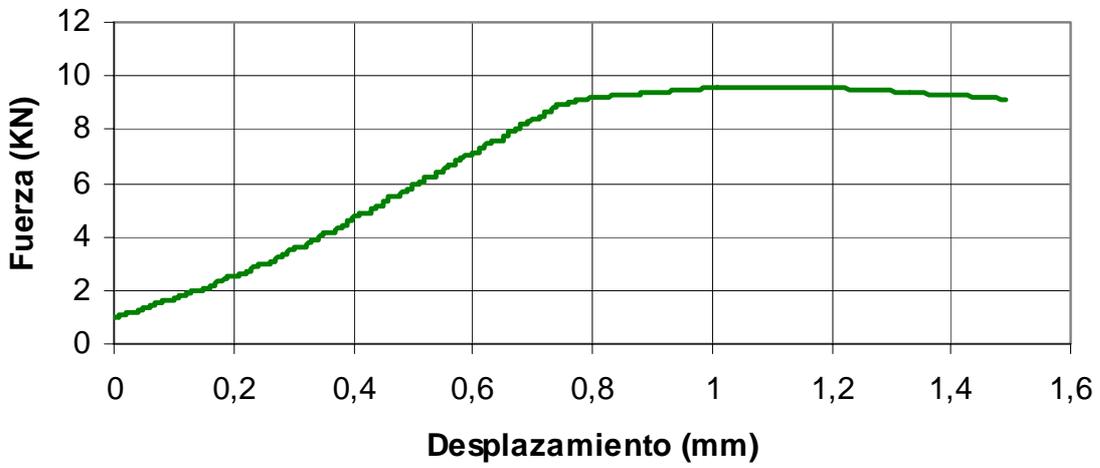
### ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA



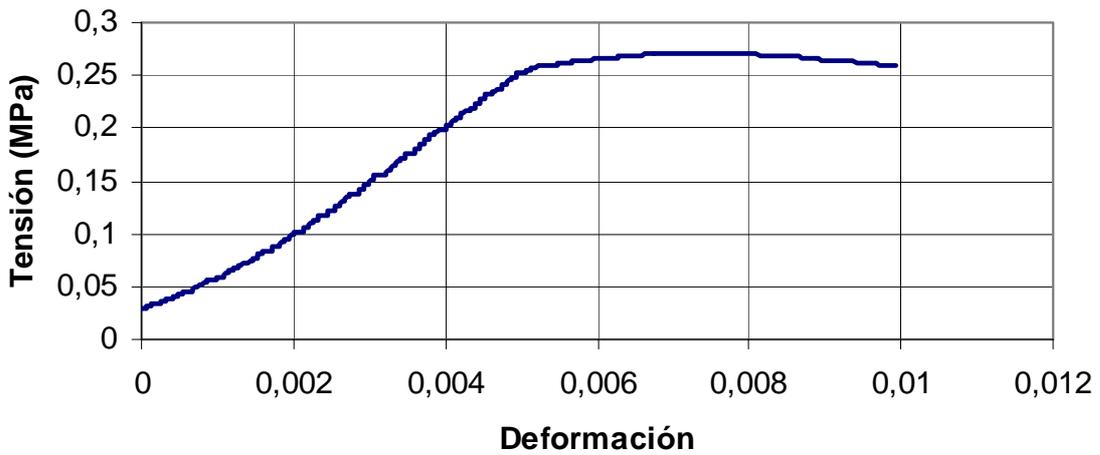
#### OBSERVACIONES

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	
Tipo de probeta	Prismática (15x15x60 cm)
Nº de probeta	EA3.2.b
Tipo de material	Reciclado de firme
Fecha fabricación	03/01/2008
Fecha ensayo	31/01/2008
Edad de la probeta (Días)	28
Longitud (mm)	260
Lados (mm)	150
Refrentado	No
Peso probeta (Kg)	13,48
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,084
Carga de rotura (kN)	9,590
Tensión de rotura (MPa)	0,271
COLOCACIÓN EN LA PRENSA	
	
ROTURA DE LA PROBETA	
	
GRÁFICO DEL PROGRAMA DE ROTURA	
	

### ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA



### ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA



#### OBSERVACIONES

---

## ANEJO 6



## CERTIFICADOS DE CALIDAD DE LOS MATERIALES Y EQUIPOS EMPLEADOS



## ÍNDICE

A6.1. CEMENTO

A6.2. AGUA

A6.3. CALIBRACIÓN PRENSA DE ROTURA A COMPRESIÓN  
Y TRACCIÓN INDIRECTA

A6.4. CALIBRACIÓN PRENSA DE ROTURA A FLEXOTRACCIÓN

A6.5. CALIBRACIÓN DE BALANZAS



**A6.1. CEMENTO**

**AENOR** Asociación Española de Normalización y Certificación

Copia



**CERTIFICADO DE REGISTRO DE EMPRESA**  
REGISTERED FIRM CERTIFICATE

**ER-0909/2001**

La Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) certifica que el Sistema de Gestión de la Calidad adoptado por: *The Spanish Association for Standardization and Certification (AENOR) certifies that Quality Management System adopted by:*

**SOCIEDAD ANÓNIMA TUDELA VEGUIN**  
**(Fábrica de la Robla)**

para: *for:*

LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO GRIS Y CLINKER PORTLAND.

THE PRODUCTION OF GREY CEMENT AND PORTLAND CLINKER.

que se realiza/n en o desde los establecimientos: *which is/are carried out in or from the establishments:*

AV. FÉLIXAS, 3/5  
24000 - LA ROBLA  
(LEÓN)

VER DIRECCIONES INDICADAS EN EL ANEXO

es conforme a las exigencias de la Norma Española UNE-EN ISO 9001:2000 Sistemas de Gestión de la Calidad. Requisitos. *Complies with the requirements of the Standard UNE-EN ISO 9001:2000 Quality Management Systems. Requirements.*

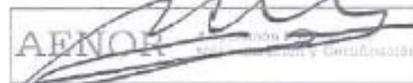
El presente Certificado es válido salvo suspensión, expiración o retirada notificada en tiempo por AENOR. *The Certificate is valid unless it is suspended, cancelled or withdrawn upon AENOR'S written notification.*

Cualquier aclaración adicional relativa tanto al alcance de este certificado como a la aplicabilidad de los requisitos de la norma ISO 9001:2000 puede obtenerse consultando a la organización. *Further clarifications regarding the scope of this certificate and the applicability of ISO 9001:2000 requirements may be obtained by consulting the organization.*

Fecha de emisión: 2001-06-18  
*Issued on:*

Fecha de renovación: 2006-12-10  
*Renewal on:*

Fecha de expiración: 2009-12-10  
*Expires on:*



El Director General de AENOR  
*General Manager of AENOR*



AENOR es miembro de la RED IQNet (Red Internacional de Certificación), cuyos miembros operan de acuerdo con la norma europea EN 45012. *AENOR is a member of the IQNet NETWORK (The International Certification Network). The members of which operate in accordance with the EN 45012 European standard.*

AENOR - C/ Génova, 6 - 28004 MADRID(España) - Teléfono: (+34) 914 326 000 - Telefax: (+34) 913 104 518 - www.aenor.es

Entidad de certificación acreditada por ENAC con acreditación n° 01/C-SC003

**AENOR** Asociación Española de  
Normalización y Certificación

## ANEXO AL CERTIFICADO DE REGISTRO DE EMPRESA

*ANNEX TO THE REGISTERED FIRM CERTIFICATE*

### ER-0909/2001

En el presente anexo se relacionan los Centros Certificados de **SOCIEDAD ANÓNIMA TUDELA VEGUIN** (Fábrica de la Robla), amparados en el Certificado de Registro de Empresa nº **ER-0909/2001**. *The Certified Centers of SOCIEDAD ANÓNIMA TUDELA VEGUIN (Fábrica de la Robla) contemplated in the Registered Firm Certificate nº ER-0909/2001 are herewith related:*

CLARGÜELLES, 25ª PLANTA  
33403 - OVIEDO  
(ASTURIAS)

PO DE SALAMANCA, 17  
24005 - LEÓN

Punto de Expedición  
MUELLES ESTACIÓN FERROCARRIL  
36688 - PORTAS  
(PONTEVEDRA)

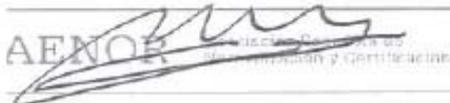
Punto de Expedición  
MUELLES ESTACIÓN FERROCARRIL  
37007 - VEJARES  
(SALAMANCA)

Punto de Expedición  
MUELLES ESTACIÓN FERROCARRIL  
CTRA. VILLALFANDE  
49129 - ZAMORA

Punto de Expedición  
ZARATAN  
43616 - ZARATAN  
(TALLADOLID)

Fecha de emisión: **2001-06-18** Fecha de renovación: **2006-12-10**  
*Issued on* *Renewed on*

Fecha de expiración: **2009-12-10**  
*Expires on*



*Por AENOR, El Director General*  
*On behalf of AENOR, The General Manager*

AENOR - Génova, 6 - 28004 MADRID (España) - Teléfono (+34) 914 326 090 - Telefax (+34) 913 104 518 - [www.aenor.es](http://www.aenor.es)



# CERTIFICATE

IQNet and  
AENOR  
hereby certify that the organization

**SOCIEDAD ANÓNIMA TUDELA VEGUIN  
(Fábrica de la Robla)**

AV PELOSAS, S/N  
24640 - LA ROBLA  
(LEON)

**SEE ADDRESSES SPECIFIED IN ANNEX**

for the following field of activities

**THE PRODUCTION OF GREY CEMENT AND PORTLAND CLINKER.**

has implemented and maintains a

**Quality Management System**

which fulfills the requirements of the following standard

**ISO 9001:2000**

Issued on: 2001-06-18

Renewed on: 2006-12-10

Validity date: 2009-12-10

**Registration Number: ES-0909/2001**



*René Wasmer*  
René Wasmer  
President of IQNet

*Ramón NAZ*  
AENOR  
General Manager of AENOR

**IQNet Partners\*:**

AENOR Spain APAQ AFNOR France AIB-Vincotte International Belgium ANCE Mexico APCER Portugal CISO Italy CQC China  
CQM China CQS Czech Republic Cro Cert Croatia DQS Germany DS Denmark ELIOT Greece FCAV Brazil  
PONDONORMA Venezuela HKQAA China ICONTEC Colombia IMNC Mexico IRAM Argentina JQA Japan KFQ Korea  
MSZT Hungary Nemko AS Norway NSAI Ireland PCBC Poland PSB Certification Singapore QMI Canada Quality Austria Austria  
RR Russia SAI Global Australia Inspecta Certification Finland SII Israel SIQ Slovenia SGS Switzerland SHAC Romania  
TEST St Petersburg Russia YUQS Serbia and Montenegro

IQNet is represented in the USA by: APAQ AFNOR, AIB-Vincotte International, CISO, DQS, NSAI, QMI and SAI Global

\* The list of IQNet partners is valid at the time of issue of this certificate. Updated information is available under [www.iqnet-certification.com](http://www.iqnet-certification.com)



*Annex to IQNet Certificate Number ES-0909/2001*  
**SOCIEDAD ANÓNIMA TUDELA VEGUIN**  
*(Fábrica de la Robla)*

Centro de Expedición  
 CL ARGÜELLES, 25ª PLANTA  
 33003 - OVIEDO  
 (ASTURIAS)

Centro de Expedición  
 PO DE SALAMANCA, 10  
 24009 - LEÓN

Centro de Expedición  
 MUELLES ESTACIÓN FERROVIARIA  
 36028 - PORTAS  
 (PONTEVEDRA)

Centro de Expedición  
 MUELLES ESTACIÓN FERROVIARIA  
 37097 - TEJARES  
 (SALAMANCA)

Centro de Expedición  
 MUELLES ESTACIÓN FERROVIARIA  
 CTRA. VILLALPANDO  
 48100 - ZARAGOZA

Centro de Expedición  
 ZARZATAN  
 47010 - ZARZATAN  
 (VALLADOLID)

Issued on: 2001-06-18

Renewed on: 2006-12-10

Validity date: 2009-12-10

*This annex is only valid in connection with the above-mentioned certificate.*



*René Wassmer*  
 René Wassmer  
 President of IQNet

*Ramón NAZ*  
 AENOR  
 Ramón NAZ  
 General Manager of AENOR

**IQNet Partners\*:**  
 AENOR Spain; AFAQ AFNOR France; AIB-Vinçotte International Belgium; ANCE Mexico; APCER Portugal; CISIQ Italy; CQC China;  
 CQM China; CQS Czech Republic; Cro Cert Croatia; DQS Germany; DS Denmark; ELOT Greece; FCAV Brazil;  
 FONDONORMA Venezuela; HSKAA China; ICONTEC Colombia; IMC Mexico; IRAM Argentina; JQA Japan; KFQ Korea;  
 MSZT Hungary; Nemko AS Norway; NSAI Ireland; PCBC Poland; PSB Certification Singapore; QMI Canada; Quality Austria Austria;  
 RR Russia; SAI Global Australia; Inspector Certification Finland; SII Israel; SIQ Slovenia; SGS Switzerland; SRAC Romania;  
 TEST St Petersburg Russia; YUQS Serbia and Montenegro  
 IQNet is represented in the USA by: AFAQ AFNOR, AIB-Vinçotte International, CISIQ, DQS, NSAI, QMI and SAI Global

\* The list of IQNet partners is valid at the time of issue of this certificate. Updated information is available under [www.iqnet-certification.com](http://www.iqnet-certification.com)



**AENOR**

Asociación Española de  
Normalización y Certificación

**CERTIFICADO AENOR DE PRODUCTO Nº 015 / 001388**  
AENOR PRODUCT CERTIFICATE Nº

**AENOR**

La Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) certifica que el producto  
The Spanish Association for Standardisation and Certification (AENOR) certifies that the product

**CEMENTO**

**CEMENT**

**CEMENTO PARA USOS ESPECIALES**  
CEMENT FOR SPECIAL USES

**ESP VI-1 32,5 N**

**UNE 80307:2001**

suministrado por

supplied by

**SOCIEDAD ANÓNIMA TUDELA VEGUIN**  
CL. ARGÜELLES, 25 33003 OVIEDO (Asturias - ESPAÑA)

y elaborado en

and manufactured in

**CL. PELOSAS, S/N**  
**24640 LA ROBLA (Leon - ESPAÑA)**

es conforme con

complies with

**UNE 80307:2001**

Para conceder este Certificado, AENOR ha inspeccionado el producto y ha comprobado el sistema de la calidad aplicado para su elaboración. AENOR realiza estas actividades periódicamente mientras el Certificado no haya sido anulado, según se establece en el Reglamento Particular RP 15.01.

In order to grant this Certificate, AENOR has tested the product and has verified the quality system used in its manufacture. AENOR performs these tasks periodically while the Certificate has not been cancelled, in accordance with the stipulations of the Specific Rules RP 15.01.

Fecha de concesión: **2002-04-01**  
First issued on:

Fecha de renovación: **2007-04-01**  
Renewed on:

Fecha de caducidad: **2012-04-01**  
Expires on:

  
**AENOR** Asociación Española de  
Normalización y Certificación  
**El Director General de AENOR**  
General Manager

No se autoriza la reproducción parcial de este documento.

The partial reproduction of this document is not permitted.

AENOR - Gávea, 8 - 28004 MADRID - Teléfono 914 32 60 00 - Telefax 913 10 46 83

Entidad de certificación acreditada por ENAC con acreditación nº 01C-PR002.015  
Certification body accredited by ENAC (accreditation number 01C-PR002.015)

**ANEXO AL CERTIFICADO AENOR DE PRODUCTO  
Nº 015/001388**

La Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) expone que el cemento indicado en el certificado cumple con todas las disposiciones relativas a la evaluación de la conformidad descritas en la norma UNE 80307:2001. Está basada en el ensayo inicial del producto y en una inspección inicial de la fábrica y del control de producción en fábrica realizada por AENOR. Además, AENOR realiza el seguimiento periódico, la evaluación y la conformidad del control de producción en fábrica y de los ensayos de las muestras tomadas en fábrica.

Conforme al Reglamento Particular de la Marca AENOR para cementos, RP 15.01, AENOR certifica que:

1. Este cemento cumple todas las especificaciones que le son de aplicación en base a la evaluación estadística de la producción mensualmente.
2. El control de producción del fabricante, el almacenamiento del cemento, la expedición del mismo tanto en fábrica como en puntos de expedición y su transporte son conformes en base a las inspecciones realizadas a sus instalaciones.
3. El cemento está sometido a un plan de control en el mercado para verificar que se mantienen las características con las que ha sido certificado.
4. El sistema de la calidad de la fábrica cumple con los requisitos, establecidos en el anexo correspondiente del Reglamento Particular.

La Marca AENOR para cementos es una marca de calidad oficialmente reconocida por la Administración a los efectos de la Instrucción de Hormigón Estructural, EHE, según se recoge en la Resolución de 26 de Abril de 2005 (BOE num. 118 de 18 de Mayo).

Fecha: **2007-04-01**  
Date:

  
El Director General de AENOR  
General Manager

*The Spanish Association for Standardization and Certification (AENOR) attests that the cement included in the certificate fulfils with all provisions concerning the conformity evaluation described in the standard UNE 80307:2001. They are based on the initial type testing and on initial inspection of the factory and the production control performed by AENOR. In addition, AENOR carries out the periodic surveillance, the assessments and the conformity of the factory production control and the audit testing of samples taken at the factory.*

*According to the Specific Rules for cement AENOR Mark, RP 15.01, AENOR certifies that:*

1. *This cement complies with all relevant specifications concerning the monthly production statistical evaluation.*
2. *The factory production control, the cement storage, the expedition from factory and the dispatching from factory and depots and the cement transport are in accordance with the inspections carried out at the different facilities.*
3. *The cement is subjected to a market surveillance control in order to check all properties like the first certification.*
4. *The factory quality system complies with the requirements included in the relevant annex in the Specific Rules.*

*The cement AENOR Mark is a quality mark officially recognized by the Spanish Administration in the field of the Structural Concrete Instruction, EHE, looking to the Resolution on 26 th April 2005 (BOE num. 118 on 18 th May 2005)*

## A6.2. AGUA



AYUNTAMIENTO  
BURGOS

ANALISIS DE AGUA

28-abr-06

<u>PARAMETRO</u>	<u>VALOR</u>
OLOR	0
SABOR	0
COLOR	0
pH	8,86
TURBIDEZ	0,17
CONDUCTIVIDAD	47,7
AMONIO	0,01
HIERRO	0,06
MANGANESO	0,00
ALUMINIO	0,06
COLORO LIBRE	0,39
COLORO TOTAL	0,45
CALCIO	4,68
CO <sub>3</sub> <sup>=</sup>	0,6
CO <sub>3</sub> H <sup>-</sup>	13,42
TEMPERATURA	7,8
Cl <sup>-</sup>	1,77
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	6,5
BACTERIAS COLIFORMES	0
CLOSTRIDIUM PERFRINGENS	0
ENTEROCOCOS INTESTINALES	0

Tel: 947 257 111 Fax: 947 257 119 [aguasdeburgos@aytoburgos.es](mailto:aguasdeburgos@aytoburgos.es) [www.aytoburgos.es](http://www.aytoburgos.es) Avda. del Cid, 12. 09005 Burgos

### A6.3. CALIBRACIÓN PRENSA DE ROTURA A COMPRESIÓN Y TRACCIÓN INDIRECTA



Calibración Nº 1208  
Página 1 de 4

**a) CERTIFICADO DE VERIFICACION SEGUN NORMA EN-7500-1**

**b) IDENTIFICACION DE LA MAQUINA**

Tipo: MÁQUINA UNIVERSAL DE TRACCIÓN-COMPRESIÓN  
Marca: SUZPECAR  
Modelo: 10 t  
Célula de carga: Suzpecar 10 t

**c) LOCALIZACIÓN Y PROPIETARIO DE LA MAQUINA**

Nombre: UNIVERSIDAD DE BURGOS  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR  
Domicilio: Edificio Milanera. Avda Villadiego, s/n  
Población: 09001 Burgos

**d) INSTRUMENTOS DE VERIFICACION EMPLEADOS**

FUERZA

- Célula de Carga

Marca:	Servosis	Marca:	H.B.M.
Modelo:	PHI/50 Tn	Modelo:	RSCB/5 Tn
Número:	780	Número:	176425A

- Indicador digital

Marca:	H.B.M.	Marca:	H.B.M.
Modelo:	MGCPPlus	Modelo:	MGCPPlus
Número:	43551	Número:	43551

- CERTIFICADO DE LOS EQUIPOS

Célula e Indicador

Número: CEM-C-05/0757-5.1	Fecha: 20-10-05	Validez: 20-10-07
Número: CEM-C-05/0759-5.1	Fecha: 20-10-05	Validez: 20-10-07

**e) TEMPERATURA DE CALIBRACIÓN**

Zona del ensayo: 20 °C

**f) FECHA DE VERIFICACIÓN**

Fecha: 28-02-08

**g) EMPRESA QUE REALIZA LA VERIFICACION**

Nombre: SERVOSIS, S.A.  
Domicilio: C/ FUENTEVEIEJA, 8-10 POL. IND. "LA ESTACION"  
Población: 28320 - PINTO (MADRID)

**h) INFORME SOBRE EL RESULTADO DE LA INSPECCION**

Antes de proceder a la calibración, se comprobaron cada una de las partes que conforman la máquina para asegurar un correcto funcionamiento de la misma.

**i) ESCALAS VERIFICADAS Y RESULTADOS OBTENIDOS**

Página Nº 3. Certificado de resultados en medida de fuerza, en el *display* del pupitre de mandos y medida PCD-2K, a compresión.



Página Nº 4. Certificado de resultados en medida de posición en el display del pupitre de mandos y medida PCD-2K.

**J) LIMITE INFERIOR DE LAS ESCALAS DE VERIFICACIÓN**

Escala de 100 kN Nivel inferior 20 kN  
Nivel superior 90 kN

**- FECHA PROPUESTA PARA LA PROXIMA VERIFICACION**

Fecha: 28-02-08

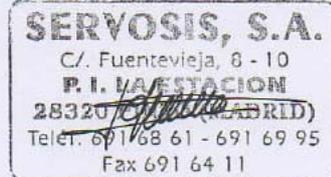
**- DOCUMENTACION QUE SE ACOMPAÑA AL INFORME**

\* Proceso de verificación de las máquinas de ensayo Según Norma EN-7500-1  
(3 páginas)

\* Certificados:

Número: CEM-C-05/0757-5.1 Hojas: 5 (cinco)  
Número: CEM-C-05/0759-5.1 Hojas 5 (cinco)

RESPONSABLE DE LA CALIBRACION



Fdo.: JOAQUIN GONZALO



**TABLA DE RESULTADOS DE LA CALIBRACION DE FUERZAS EN EL MODULO DE MEDIDA Y CONTROL PCD-2K**

CONFIGURACION: 100,00 kN

VALORES LEIDOS:

$F_n = 100$  kN  
 $F_{io} = 0,08$  kN  
 $r = 0,01$  kN

Fuerza	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Valor Medio
20	20,10	19,96	20,08	20,044
30	30,13	29,94	30,08	30,050
40	40,14	39,93	40,06	40,042
50	50,12	49,91	50,07	50,032
60	60,12	59,88	60,07	60,021
70	70,90	69,85	70,06	70,269
90	90,04	89,91	90,02	89,886

VALORES CALCULADOS:

Fuerza	q	b	v	a	lc	$F_o$
20	0,22	0,72		0,05	0,44	0,08
30	0,17	0,61		0,03	0,37	
40	0,11	0,51		0,03	0,30	
50	0,06	0,41		0,02	0,24	
60	0,04	0,39		0,02	0,23	
70	0,38	1,50		0,01	0,89	
90	-0,02	0,15		0,01	0,10	

**CLASE DE MAQUINA: 1ª (PRIMERA) ENTRE 20 Y 90 kN.**

**LA INCERTIDUMBRE ASOCIADA ENTRE 20 Y 90 kN ES DEL 0,89 %.**



**TABLA DE RESULTADOS DE LA CALIBRACION DE POSICION EN EL MODULO DE MEDIDA Y CONTROL PCD-2K**

CONFIGURACION: 400,00 mm.

VALORES LEIDOS:

$P_n = 400$  mm  
 $P_{10} = 0,03$  mm  
 $r = 0,01$  mm

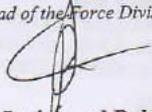
Posición	Serie 1	Serie 2	Valor Medio
10	10,00	10,02	10,010
20	20,04	20,08	20,060
50	50,02	50,05	50,035
100	100,02	100,05	100,035
200	200,12	200,23	200,175
300	300,53	300,62	300,575

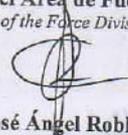
VALORES CALCULADOS:

Posición	q	b	v	a	lc	$P_o$
10	0,10	0,20		0,10	0,14	0,01
20	0,30	0,20		0,05	0,21	
50	0,07	0,06		0,02	0,05	
100	0,03	0,03		0,01	0,03	
200	0,09	0,05		0,01	0,06	
300	0,19	0,03		0,00	0,11	

LA INCERTIDUMBRE ASOCIADA PARA TODO EL RECORRIDO ES DEL 0,21 %.

## A6.4. CALIBRACIÓN PRENSA DE ROTURA A FLEXOTRACCIÓN

 MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO		
CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGIA <i>Spanish Centre of Metrology</i>		
C/del Alfar, 2. 28760 Tres Cantos (Madrid) Tf.: (+34) 91 8074 700 / Fax: (+34) 91 8074 807 / <a href="mailto:cem@cem.es">cem@cem.es</a> / <a href="http://www.cem.es">www.cem.es</a>		
<b>CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN/MEDIDA</b> <i>Certificate of Calibration/Measurement</i>		
<b>Número (Number): CEM-C-05/0759-5.1</b>		
<b>Objeto(s) / Descripción:</b> <i>Object(s) / Description :</i>	Transductor de fuerza extensométrico / Alcance nominal 50 kN	
<b>Fabricante / Marca :</b> <i>Manufacturer / Trademark :</i>	HBM / HBM	
<b>Modelo / Nº serie :</b> <i>Model / Serial Number :</i>	RSCB-5T /176425A	
<b>Método / Procedimiento :</b> <i>Method / Procedure :</i>	CEM-PT-5.1-06	
<b>Fecha(s) de Calibración :</b> <i>Date(s) of calibration :</i>	13-10-05	
<b>Expedido a :</b> <i>Issued to :</i>	Servosis, S.A. Fuentevieja, 8-10 Poligno Industrial La Estación 28320 Pinto (Madrid)	
<b>Fecha de Emisión :</b> <i>Date of issue :</i>	20 de octubre de 2005	
<b>Nº de páginas :</b> <i>Number of pages :</i>	1 / 5	
<b>Sello :</b> <i>Stamp :</i>		<b>El Jefe del Área de Fuerza</b> <i>The Head of the Force Division</i> 
	<b>Fdo. (signed by) : José Ángel Robles Carbonell</b>	
<p>Este Certificado no atribuye al objeto calibrado/medido otras características que las indicadas por los datos aquí contenidos. Los resultados se refieren al momento y condiciones en que se efectuaron las mediciones y poseen trazabilidad directa a patrones nacionales. No se permite la reproducción parcial de este documento sin autorización expresa para ello.</p> <p>El presente Certificado es coherente con las Capacidades de Medida y Calibración (CMC) incluidas en el Anexo C del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo (ARM) redactado por el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM). Según el ARM, todos los Institutos participantes reconocen entre sí la validez de sus certificados de calibración y de medida para las magnitudes, campos e incertidumbres especificados en el citado Anexo C (para más detalles véase <a href="http://www.bipm.org">http://www.bipm.org</a>).</p> <p><i>This Certificate does not confer to the object calibrated/measured attributes beyond those shown by the data contained herein. Results refer to the dates and conditions in which measurements were carried out and possesses traceability to national standards. Partial reproduction of this document is not permitted without written permission.</i></p> <p><i>This Certificate is consistent with Calibration and Measurement Capabilities (CMCs) that are included in Appendix C of the Mutual Recognition Arrangement (MRA) drawn up by the International Committee for Weights and Measures (CIPM). Under the MRA, all participating institutes recognize the validity of each other's calibration and measurement certificates for the quantities, ranges and measurement uncertainties specified in Appendix C (for details see <a href="http://www.bipm.org">http://www.bipm.org</a>).</i></p>		
G0.1-54-01		

 MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO		
<b>CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGIA</b> <i>Spanish Centre of Metrology</i>		
C/del Alfár, 2. 28760 Tres Cantos (Madrid) Tf.: (+34) 91 8074 700 / Fax: (+34) 91 8074 807 / <a href="mailto:cem@cem.es">cem@cem.es</a> / <a href="http://www.cem.es">www.cem.es</a>		
<b>CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN/MEDIDA</b> <i>Certificate of Calibration/Measurement</i>		
<b>Número (Number): CEM-C-05/0757-5.1</b>		
<b>Objeto(s) / Descripción:</b> <i>Object(s) / Description :</i>	Transductor de fuerza extensométrico / Alcance nominal 500 kN	
<b>Fabricante / Marca :</b> <i>Manufacturer / Trademark :</i>	Servosis / Servosis	
<b>Modelo / N° serie :</b> <i>Model / Serial Number :</i>	PHI-50 /780	
<b>Método / Procedimiento :</b> <i>Method / Procedure :</i>	CEM-PT-5.1-06	
<b>Fecha(s) de Calibración :</b> <i>Date(s) of calibration :</i>	11-10-05	
<b>Expedido a :</b> <i>Issued to :</i>	Servosis, S.A. Fuentevieja, 8-10 Poligono Industrial La Estación 28320 Pinto (Madrid)	
<b>Fecha de Emisión :</b> <i>Date of issue :</i>	20 de octubre de 2005	
<b>N° de páginas :</b> <i>Number of pages :</i>	1 / 5	
<b>Sello :</b> <i>Stamp :</i>		<b>El Jefe del Área de Fuerza</b> <i>The Head of the Force Division</i>  
<b>Fdo. (signed by) : José Ángel Robles Carbonell</b>		
<p>Este Certificado no atribuye al objeto calibrado/medido otras características que las indicadas por los datos aquí contenidos. Los resultados se refieren al momento y condiciones en que se efectuaron las mediciones y poseen trazabilidad directa a patrones nacionales. No se permite la reproducción parcial de este documento sin autorización expresa para ello.</p> <p>El presente Certificado es coherente con las Capacidades de Medida y Calibración (CMC) incluidas en el Anexo C del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo (ARM) redactado por el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM). Según el ARM, todos los Institutos participantes reconocen entre sí la validez de sus certificados de calibración y de medida para las magnitudes, campos e incertidumbres especificados en el citado Anexo C (para más detalles véase <a href="http://www.bipm.org">http://www.bipm.org</a>).</p> <p><i>This Certificate does not confer to the object calibrated/measured attributes beyond those shown by the data contained herein. Results refer to the dates and conditions in which measurements were carried out and possesses traceability to national standards. Partial reproduction of this document is not permitted without written permission.</i></p> <p><i>This Certificate is consistent with Calibration and Measurement Capabilities (CMCs) that are included in Appendix C of the Mutual Recognition Arrangement (MRA) drawn up by the International Committee for Weights and Measures (CIPM). Under the MRA, all participating Institutes recognize the validity of each other's calibration and measurement certificates for the quantities, ranges and measurement uncertainties specified in Appendix C (for details see <a href="http://www.bipm.org">http://www.bipm.org</a>).</i></p>		
G0.1-54-01		



**a) CERTIFICADO DE VERIFICACION SEGUN NORMA EN-7500-1**

**b) IDENTIFICACION DE LA MAQUINA**

Tipo: MÁQUINA DE ENSAYOS DE TRACCIÓN DE ACEROS  
Marca: SUZPECAR  
Modelo: F102W  
Nº Fabricación: 3274

**c) LOCALIZACIÓN Y PROPIETARIO DE LA MAQUINA**

Nombre: UNIVERSIDAD DE BURGOS (EPS)  
Domicilio: C/ Villadiego s/n  
Población: BURGOS

**d) INSTRUMENTOS DE VERIFICACION EMPLEADOS**

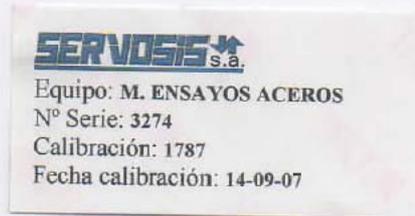
FUERZA

- Célula de Carga

Marca: Servosis  
Modelo: PHI/50 Tn  
Número: 780

- Indicador digital

Marca: H.B.M.  
Modelo: MGCPlus  
Número: 43551



- CERTIFICADO DE LOS EQUIPOS

Célula e Indicador

Número: CEM-C-05/0757-5.1      Fecha: 20-10-05      Validez: 20-10-07

**e) TEMPERATURA DE CALIBRACIÓN**

Zona del ensayo: 23 °C

**f) FECHA DE VERIFICACIÓN**

Fecha: 14-09-07

**g) EMPRESA QUE REALIZA LA VERIFICACION**

Nombre: SERVOSIS, S.A.  
Domicilio: C/ FUENTEVEIEJA, 8-10 POL. IND. "LA ESTACION"  
Población: 28320 - PINTO (MADRID)

**h) INFORME SOBRE EL RESULTADO DE LA INSPECCION**

Antes de proceder a la calibración, se comprobaron cada una de las partes que conforman la máquina para asegurar un correcto funcionamiento de la misma.

**i) ESCALAS VERIFICADAS Y RESULTADOS OBTENIDOS**

Página Nº 3.      Certificado de resultados en medida de fuerza, en el *display* del pupitre de mandos y medida, a tracción.



**j) LIMITE INFERIOR DE LAS ESCALAS DE VERIFICACIÓN**

Escala de 20 t Nivel inferior: 5 t.  
Nivel superior: 22 t.

**- FECHA PROPUESTA PARA LA PROXIMA VERIFICACION**

Fecha: 14-09-08

**- DOCUMENTACION QUE SE ACOMPAÑA AL INFORME**

\* Proceso de verificación de las máquinas de ensayo Según Norma EN-7500-1  
(3 páginas)

\* Certificados:

Número: CEM-C-05/0757-5.1 Hojas: 5 (cinco)

RESPONSABLE DE LA CALIBRACION



Fdo.: JOAQUIN GONZALO



**TABLA DE RESULTADOS DE LA CALIBRACION DE FUERZAS EN EL MODULO DE MEDIDA Y CONTROL**

VALORES LEIDOS:

$F_n = 20 \text{ t}$   
 $F_{10} = 0,002 \text{ t}$   
 $r = 0,001 \text{ t}$

Fuerza	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Valor Medio
5	5,045	5,030	5,040	5,0383
7	7,030	7,021	7,031	7,0274
10	10,010	9,993	10,001	10,0013
13	13,000	13,003	13,024	13,0090
16	15,975	16,003	16,021	15,9997
18	17,961	18,100	18,031	18,0307
20	19,941	20,021	20,012	19,9913
22	22,010	21,930	21,900	21,9467

VALORES CALCULADOS:

Fuerza	q	b	v	a	lc	F <sub>0</sub>
5	0,77	0,30		0,02	0,48	0,01
7	0,39	0,14		0,01	0,24	
10	0,01	0,17		0,01	0,10	
13	0,07	0,18		0,01	0,11	
16	0,00	0,29		0,01	0,17	
18	0,17	0,77		0,01	0,46	
20	-0,04	0,40		0,01	0,23	
22	-0,24	0,50		0,00	0,32	

**CLASE DE MAQUINA: 1ª (PRIMERA) ENTRE 5 Y 22 t.**

**LA INCERTIDUMBRE ASOCIADA ENTRE 5 Y 22 t ES DEL 0,48 %.**



CALIBRACIÓN  
N.º 55/LC091

CERTIFICADO DE CALIBRACION  
Certificate of calibration

Número: 21359  
Number:

INFORME DE CALIBRACIÓN.  
Calibration report.

NUMERO DE PAGINAS Y ANEXOS: 6 páginas  
Number of pages and attached documents

TÉCNICAS DE CALIBRACIÓN Y CONTROL

Calle Luis Vives 13-15  
Polígono industrial CODEIN  
Fuenlabrada  
28946 MADRID  
tf: 916153105 fax: 916153115

**TCC S.L.**

OBJETO : Máquina de ensayos  
Item

MARCA : SISTEMAS DE ENSAYOS  
Mark

MODELO : MEM-101/SDC  
Model

IDENTIFICACIÓN : 3061  
Identification

SOLICITANTE : UNIVERSIDAD DE BURGOS  
Applicant  
Dpto de Cosnrucciones Arquitectónicas  
C/ Villadiego s/n  
09001 Burgos

FECHA/S DE CALIBRACIÓN: 19-10-2006  
Date/s of calibration

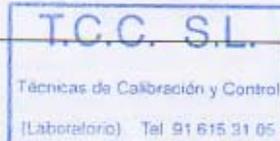
NUMERO DE EXPEDIENTE: 06-858  
Expedient number

Signatario/s autorizado/s :  
Authorized signatory/ies

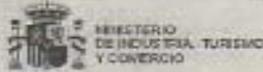
FECHA DE EMISIÓN: 31-10-2006  
Date of issue

  
Carlos A. Correa Pardo

Jefe de laboratorio



Este certificado se expide de acuerdo con las condiciones de la acreditación concedida por ENAC, que ha comprobado las capacidades de medida del laboratorio y su trazabilidad a patrones nacionales. Este certificado no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio que lo emite y de ENAC.  
This certificate is issued in accordance with the conditions of accreditation granted by ENAC, which has assessed the measurement capability of the laboratory and its traceability to national standards.  
This certificate may NOT be partially reproduced, except with the prior written permission of the issuing laboratory and ENAC.



CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGIA  
Spanish Centre of Metrology

C/ del Alfil, 2, 28760 Tres Cantos (Madrid)  
TF: (+34) 91 8074 700 / Fax: (+34) 91 8074 807 / [gem@cem.es](mailto:gem@cem.es) / [www.cem.es](http://www.cem.es)

## CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN/MEDIDA

*Certificate of Calibration/Measurement*

Número (Number): **CEM-C-05/0757-5.1**

**Objeto(s) / Descripción:** Transductor de fuerza extensométrico / Alcance nominal 500 kN  
*Object(s) / Description :*

**Fabricante / Marca :** Servosis / Servosis  
*Manufacturer / Trademark :*

**Modelo / Nº serie :** PHI-50 / 780  
*Model / Serial Number :*

**Método / Procedimiento :** CEM-PT-5.1-06  
*Method / Procedure :*

**Fecha(s) de Calibración :** 11-10-05  
*Date(s) of calibration :*

**Expedido a :** Servosis, S.A.  
*Issued to :* Fuentevieja, 8-10 Poligono Industrial La Estación  
28320 Pinto (Madrid)

**Fecha de Emisión :** 20 de octubre de 2005  
*Date of issue :*

**Nº de páginas :** 1 / 5  
*Number of pages :*

**Sello :**  
*Stamp :*



**El Jefe del Área de Fuerza**  
*The Head of the Force Division*

**Fdo. (signed by) : José Ángel Robles Carbonell**

Este Certificado no atribuye al objeto calibrado/medido otras características que las indicadas por los datos aquí contenidos. Los resultados se refieren al momento y condiciones en que se efectuaron las mediciones y poseen trazabilidad directa a patrones nacionales. No se permite la reproducción parcial de este documento sin autorización expresa para ello.

El presente Certificado es coherente con las Capacidades de Medida y Calibración (CMC) incluidas en el Anexo C del Acuerdo de Reconocimiento Mútuo (ARM) redactado por el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM). Según el ARM, todos los Institutos participantes reconocen entre sí la validez de sus certificados de calibración y de medida para las magnitudes, rangos e incertidumbres especificados en el citado Anexo C (para más detalles véase <http://www.bipm.org>).

This Certificate does not confer on the object calibrated/measured attributes beyond those shown by the data contained herein. Results refer to the date and conditions in which measurements were carried out and possess traceability to national standards. Partial reproduction of this document is not permitted without written permission.

This Certificate is consistent with Calibration and Measurement Capabilities (CMCs) that are included in Appendix C of the Mutual Recognition Arrangement (MRA) drawn up by the International Committee for Weights and Measures (CIPM). Under the MRA, all participating institutes recognize the validity of each other's calibration and measurement certificates for the quantities, ranges and uncertainties specified in Appendix C (for details see <http://www.bipm.org>).

## A6.5. CALIBRACIÓN DE BALANZAS

 Nº 93/LC212	<b>CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN</b> <i>Certificate of calibration</i>
Número <b>LEM804089-06r0</b> <i>Number</i>	Página 1 de 8 páginas <i>Page 1 of 8 pages</i>
LEM804089-06r0	Formato: LEM900800-04r0   07/07/04
<b>LABORATORIO DE ENSAYOS METROLÓGICOS, S.L.</b>	
Pol. Ind. Cova Solera – Avda. Can Sucarrats, 110; Nave 11 08191 Rubí (Barcelona)	
Apartado de Correos 239 (P.O. Box 239)	
Teléfono 93-586.26.80	Fax. 93-586.26.81
Telephone 34 3 586.26.80	Fax. 34 3 586.26.81
e-mail: <a href="mailto:cial@lem-sl.com">cial@lem-sl.com</a>	
	
<b>OBJETO</b> <i>Item</i>	<b>Balanza electrónica</b> <b>S/Ref. BE/01</b>
<b>MARCA</b> <i>Mark</i>	<b>Plataforma: COBOS</b> <b>Visor:---</b>
<b>MODELO</b> <i>Model</i>	<b>Plataforma: 20 K 60</b> <b>Visor: ---</b>
<b>IDENTIFICACIÓN</b> <i>Identification</i>	<b>Plataforma: ---</b> <b>Visor: 59F99E0011</b>
<b>SOLICITANTE</b> <i>Applicant</i>	<b>UNIV. DE BURGOS, ESCUELA POLITECNICA</b> <b>C/ Villadiego, s/n</b> <b>09001 Burgos (Burgos)</b>
<b>FECHA/S DE CALIBRACIÓN</b> <i>Date/s of calibration</i>	<b>22/12/2006</b>
Signatario/s autorizado/s <i>Authorized signatory/ies</i>	Fecha de emisión 17/01/2007 <i>Date of issue</i>
	
<b>José Sánchez González</b> <b>Jefe del Área de Masa</b>	
<p>Este certificado se expide de acuerdo con las condiciones de la acreditación concedida por ENAC, que ha comprobado las capacidades de medida del laboratorio y su trazabilidad a patrones nacionales.          Este certificado no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio que lo emite y de ENAC.  <i>This certificate is issued in accordance with the conditions of accreditation granted by ENAC which has assessed the measurement capability of the laboratory and its traceability to national standards.</i>  <i>This certificate may not be partially reproduced except with the prior written permission of the issuing laboratory and ENAC.</i></p>	



# CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

*Certificate of calibration*

Número LEM804090-06r0  
*Number*

Página 1 de 12 páginas  
*Page 1 of 12 pages*

LEM804090-06r0

Formato: LEM900800-04r0 | 07/07/04

## LABORATORIO DE ENSAYOS METROLÓGICOS, S.L.

Pol. Ind. Cova Solera – Avda. Can Sucarrats, 110; Nave 11  
08191 Rubí (Barcelona)

Apartado de Correos 239 (P.O. Box 239)

Teléfono 93-586.26.80 Fax. 93-586.26.81  
Telephone 34 3 586.26.80 Fax. 34 3 586.26.81

e-mail: [cial@lem-sl.com](mailto:cial@lem-sl.com)



**OBJETO**  
*Item*

Balanza electrónica  
S/Ref. BE/02

**MARCA**  
*Mark*

COBOS

**MODELO**  
*Model*

BX-3200 D

**IDENTIFICACIÓN**  
*Identification*

414800190

**SOLICITANTE**  
*Applicant*

UNIV. DE BURGOS, ESCUELA POLITECNICA  
C/ Villadiego, s/n  
09001 Burgos (Burgos)

**FECHA/S DE CALIBRACIÓN**  
*Date/s of calibration*

22/12/2006

Signatario/s autorizado/s  
*Authorized signatory/ies*

Fecha de emisión 17/01/2007  
*Date of issue*



José Sánchez González  
Jefe del Área de Masa

Este certificado se expide de acuerdo con las condiciones de la acreditación concedida por ENAC, que ha comprobado las capacidades de medida del laboratorio y su trazabilidad a patrones nacionales.

Este certificado no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio que lo emite y de ENAC.

*This certificate is issued in accordance with the conditions of accreditation granted by ENAC which has assessed the measurement capability of the laboratory and its traceability to national standards.*

*This certificate may not be partially reproduced except with the prior written permission of the issuing laboratory and ENAC.*