



UNIVERSIDAD DE BURGOS
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

PROGRAMA DE DOCTORADO
«INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL»
TESIS DOCTORAL

**«Determinación del módulo de deformación
dinámico de un mortero de revestimiento a partir
de muestras obtenidas en laboratorio e *in situ*.»**



Autor: Guillermo Aragón Torre
Director: Dr. Angel Aragón Torre
Burgos, 3 de noviembre de 2015

Resumen.

El módulo de deformación de morteros de revestimiento se considera una propiedad fundamental en la mayoría de los estándares y sin embargo es una de las menos determinadas en el laboratorio. Hay todavía pocos estudios sobre su evaluación a partir de muestras recogidas *in situ* y la mayor parte de ellos enfocados al campo de la restauración, lo que daríamos en llamar morteros históricos (Drdácký, 2011; Válek, Hughes, & Groot, 2013).

El trabajo que recoge esta Tesis Doctoral propone determinar el módulo de deformación dinámico de una única composición comercial de un mortero monocapa de revestimiento y comprobar en qué manera su medida está condicionada por el tipo de ensayo, la edad y la forma de la probeta, con el fin de poder llegar a correlacionar una muestra de formato 40 x 40 x 160 mm con otra no normalizada obtenida *in situ* de un mortero puesto en obra.

El procedimiento de ensayo de referencia es el propuesto por la norma americana de hormigón (ASTM-C215, 2008) y que recoge el fabricante en el DIT plus del producto (DIT_plus:543p/09, 2009).

La primera parte del trabajo comprende la caracterización del material para lo cual se realizarán una serie de ensayos normalizados sobre determinadas propiedades del mortero, tanto en polvo, en pasta como endurecido, y así poder contrastar sus resultados con los declarados por el fabricante.

La segunda parte del trabajo se centra en la realización sistemática de ensayos no destructivos previos que permitan conocer también las propiedades elásticas del mortero, en particular sus módulos de deformación estático y dinámico, el módulo de deformación transversal dinámico y el coeficiente de Poisson.

Antes se desarrolla el estado del arte sobre la cuestión planteada y finalmente se exponen los resultados en base a los datos extraídos y las conclusiones finalmente elaboradas.

PALABRAS CLAVE: mortero de revestimiento, módulo de deformación, ensayos dinámicos.

Agradecimientos.

La mayor parte de este trabajo se ha realizado dentro del Grupo de Investigación en Tecnología de Estructuras (GITE) de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos. Para su desarrollo se ha dispuesto del taller de Grandes Estructuras del Departamento de Ingeniería Civil y del taller de Materiales del Departamento de Construcciones Arquitectónicas.

Quiero empezar agradeciendo a mi director de Tesis D. Ángel Aragón, no solo su dedicación y esfuerzo, sino también la motivación constante para completar a buen fin este trabajo. Sin sus explicaciones y conocimientos detallados sobre los procedimientos de ensayos aplicados no hubiese sido posible completar este documento. También agradecer a mi tutor D. Oscar González los consejos añadidos.

No puedo dejar de mencionar a los profesores D. Juan Manuel Manso y D. José Antonio Martínez por todo lo que han aportado para facilitar el camino por el que ha transcurrido esta investigación, sin su orientación habríamos perdido un enfoque fundamental para el logro del objetivo final y, por supuesto, agradecer a D. Luis A. Suarez su colaboración por la aportación de conocimientos y medios para la comprensión y el desarrollo de los procedimientos dinámicos.

También he tenido la suerte de contar con la ayuda permanente del equipo de profesionales que forman los técnicos de los talleres de Grandes Estructuras y de Construcciones Arquitectónicas, especialmente a D. Roberto Lorenzo, D. Antonio Fernández, D. José Luis Díez y D. Pablo Campos con los que he compartido multitud de horas de trabajo y charla, a las que también se sumó D. Alfonso Martín alumno del Grado en Ingeniería Civil. Muchas gracias por vuestra paciencia

Quiero agradecer a la empresa ONEXIT IDATEC, S.L. la aportación del material para la realización de las muestras de laboratorio.

Mi agradecimiento final para mi familia y amigos y especialmente a mis hijas Alejandra y Alba y a Mar por su amor y apoyo en los momentos difíciles.

Tabla de contenidos.

Tabla de contenidos	v
Lista de tablas	vii
Índice de figuras	ix
Introducción general	1

CAPÍTULO 1.

ESTADO DEL ARTE.	7
1.1. INTRODUCCIÓN.	9
1.2. MORTEROS MONOCAPA.	10
1.3. RESISTENCIA MECÁNICA.	24
1.4. MÓDULO DE DEFORMACIÓN.	29
1.5. MÓDULO DE POISSON, N.	39
1.6. EFECTO TAMAÑO.	40
1.7. ANÁLISIS NUMÉRICO.	41

CAPÍTULO 2.

CARACTERIZACIÓN DEL MORTERO	49
2.1. INTRODUCCIÓN.	51
2.2. MORTERO EN POLVO.....	53
2.3. MORTERO EN PASTA.	56
2.4. MORTERO ENDURECIDO.....	68
2.5. TABLA RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL MORTERO.	93

CAPÍTULO 3.

ADAPTACIÓN A MORTEROS DE ENSAYOS NORMALIZADOS	95
3.1. INTRODUCCIÓN.	97
3.2. DETERMINACIÓN DE MÓDULOS ESTÁTICOS, E_s	98
3.3. DETERMINACIÓN DE MÓDULOS DINÁMICOS.	104
3.4. PLAN DE ENSAYOS.....	125

CAPÍTULO 4.	
	ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS..... 131
4.1. INTRODUCCIÓN.	133
4.2. RESISTENCIA A FLEXIÓN Y A COMPRESIÓN.	134
4.3. MÓDULO DE DEFORMACIÓN ESTÁTICO ($E_{M,S}$).	136
4.4. ANÁLISIS NUMÉRICO.	142
4.5. MÓDULO DE DEFORMACIÓN DINÁMICO (MOE).	145
4.6. COEFICIENTE DE POISSON, ν	157
 CAPÍTULO 5.	
	CONCLUSIONES. 161
 CAPÍTULO 6.	
	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN..... 163
 CAPÍTULO 7.	
	BIBLIOGRAFÍA. 165
 ANEXO A.	
	DATOS Y RESULTADOS..... 173

Lista de tablas.

TABLA 1-1 CLASIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL MORTERO ENDURECIDO SEGÚN UNE-EN 998-1.....	21
TABLA 1-2 REQUISITOS QUE TIENE QUE CUMPLIR UN REVESTIMIENTO SEGÚN CTE.	22
TABLA 2-1 CARACTERÍSTICAS DEL MORTERO ONEXIT MONOCAPA UNIVERSAL FACILITADAS POR EL FABRICANTE.	52
TABLA 2-2 RESULTADOS DE LA CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE AGUA POR SUCCIÓN PARA MORTERO FRESCO. MUESTRA 1.	60
TABLA 2-3 RESULTADOS DE LA CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE AGUA POR SUCCIÓN PARA MORTERO FRESCO. MUESTRA 2.	60
TABLA 2-4 DESIGNACIÓN DEL MORTERO FRESCO EN FUNCIÓN DEL VALOR DE LA CONSISTENCIA.	62
TABLA 2-5 RESULTADOS DEL ENSAYO PARA DETERMINACIÓN DE LA CONSISTENCIA DEL MORTERO FRESCO.	62
TABLA 2-6 PROCEDIMIENTOS OPERATORIOS PARA DETERMINAR LA DENSIDAD APARENTE DE LOS MORTEROS.	64
TABLA 2-7 RESULTADOS DEL ENSAYO PARA DETERMINACIÓN DE DENSIDAD APARENTE DEL MORTERO FRESCO.	65
TABLA 2-8 RESULTADOS DEL ENSAYO PARA DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO EN AIRE EN EL MORTERO FRESCO.	67
TABLA 2-9 AMASADAS Y NUMERACIÓN DE PROBETAS PARA ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL MORTERO A LOS 28 DÍAS.	71
TABLA 2-10 RESULTADOS DEL ENSAYO PARA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN.	74
TABLA 2-11 RESULTADOS DEL ENSAYO PARA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN.	77
TABLA 2-12 MASA SECA PROBETAS MP03 Y MP04.....	80
TABLA 2-13 MASA SECA PROBETAS MP09 Y MP10.....	80
TABLA 2-14 MASA SECA PROBETAS MP15 Y MP16.....	80
TABLA 2-15 VOLUMEN PROBETAS MP03 Y MP04.	81
TABLA 2-16 VOLUMEN PROBETAS MP09 Y MP10.	81
TABLA 2-17 VOLUMEN PROBETAS MP15 Y MP16.	81
TABLA 2-18 DENSIDAD APARENTE EN SECO PROBETAS MP03 Y MP04.	82
TABLA 2-19 DENSIDAD APARENTE EN SECO PROBETAS MP09 Y MP10.	82
TABLA 2-20 DENSIDAD APARENTE EN SECO PROBETAS MP15 Y MP16.	82
TABLA 2-21 MEDIDAS PROBETAS MP05 Y MP06.....	85
TABLA 2-22 MEDIDAS PROBETAS MP11 Y MP12.....	85
TABLA 2-23 MEDIDAS PROBETAS MP17 Y MP18.....	85
TABLA 2-24 RETRACCIÓN PROBETAS MP05 Y MP06.	86
TABLA 2-25 RETRACCIÓN PROBETAS MP11 Y MP12.	86
TABLA 2-26 RETRACCIÓN PROBETAS MP17 Y MP18.	86
TABLA 2-27 MODOS DE VIBRACIÓN Y FRECUENCIAS NATURALES PARA PROBETAS DE 40 X 40 X 160 MM.....	87
TABLA 2-28 MODOS DE VIBRACIÓN Y FRECUENCIAS NATURALES PARA PROBETAS DE 20 X 40 X 160 MM.....	91
TABLA 2-29 MODOS DE VIBRACIÓN Y FRECUENCIAS NATURALES PARA PROBETAS DE 15 X 40 X 160 MM.....	92
TABLA 2-30 RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS.	93
TABLA 3-1 VALORES DEL FACTOR DE CORRECCIÓN T. (PICKETT,1945).....	116
TABLA 3-2 VALOR DE C PARA CUALQUIER PROBETA.	117
TABLA 3-3 VALOR DE C PARA PROBETAS ESTÁNDAR PRISMÁTICAS.	118
TABLA 3-4 MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO LONGITUDINAL.....	124
TABLA 3-5 PLAN DE ENSAYOS.	125
TABLA 4-1 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE POISSON	157

Índice de figuras.

FIG. 1 DETALLE DE FISURACIÓN DEL MORTERO DE REVESTIMIENTO.	1
FIG. 2 EXTRACCIÓN DE BLOQUE DE FACHADA PARA LA ELABORACIÓN DE MUESTRAS DE MORTERO <i>IN SITU</i>	3
FIG. 1-1 MÓDULO SECANTE MEDIDO SOBRE EL ESCALÓN DE CARGA PROPUESTO POR LA NORMA DE HORMIGÓN.	32
FIG. 2-1 MORTERO MONOCAPA ONEXIT UNIVERSAL.	51
FIG. 2-2 MICROGRAFÍA 01. ASPECTO DEL PREMEZCLADO SECO SUMINISTRADO (50x).	53
FIG. 2-3 MICROGRAFÍA 02. ASPECTO DEL PREMEZCLADO SECO SUMINISTRADO (100x).	54
FIG. 2-4 MICROGRAFÍA 03. ASPECTO DE LA PARTÍCULA ALVEOLAR (1000x).	54
FIG. 2-5 ANÁLISIS ELEMENTAL DE LA PARTÍCULA ALVEOLAR.	55
FIG. 2-6 AMASADORA.	56
FIG. 2-7 ENSAYO DE DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE AGUA POR SUCCIÓN DEL MORTERO FRESCO.	59
FIG. 2-8 ENSAYO DE DETERMINACIÓN DE LA CONSISTENCIA DEL MORTERO FRESCO.	63
FIG. 2-9 ENSAYO DE DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE DEL MORTERO FRESCO.	64
FIG. 2-10 ENSAYO DE DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO EN AIRE EN EL MORTERO FRESCO.	67
FIG. 2-11 MOLDES PARA LA FABRICACIÓN DE PROBETAS PARA ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL MORTERO.	69
FIG. 2-12 ALMACENAJE DE LAS PROBETAS EN EL CUARTO DE CURADO.	70
FIG. 2-13 TIPOLOGÍAS DE PROBETAS PARA ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL MORTERO A LOS 28 DÍAS.	70
FIG. 2-14 ENSAYO DE DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A FLEXIÓN DEL MORTERO ENDURECIDO.	73
FIG. 2-15 ENSAYO DE DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL MORTERO ENDURECIDO.	76
FIG. 2-16 ENSAYO DE DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE EN SECO DEL MORTERO ENDURECIDO.	79
FIG. 2-17 ENSAYO DE DETERMINACIÓN DE LA RETRACCIÓN DEL MORTERO.	84
FIG. 2-18 MODOS DE VIBRACIÓN DE LA PROBETA DE FORMATO NORMALIZADO 40 x 40 x 160 MM.	88
FIG. 2-19 "MODO DE VIBRACIÓN 1 = FLEXIÓN 1".	89
FIG. 2-20 "MODO DE VIBRACIÓN 2 = FLEXIÓN 2".	89
FIG. 2-21 "MODO DE VIBRACIÓN 3 = TORSIÓN".	89
FIG. 2-22 "MODO DE VIBRACIÓN 4 = DOBLE FLEXIÓN 1".	90
FIG. 2-23 "MODO DE VIBRACIÓN 5 = DOBLE FLEXIÓN 2".	90
FIG. 2-24 "MODO DE VIBRACIÓN 6 = AXIL (LONGITUDINAL)".	90
FIG. 3-1 GALGAS INSTRUMENTADAS EN LAS PROBETAS.	98
FIG. 3-2 POSICIÓN DURANTE EL ENSAYO.	98
FIG. 3-3 EQUIPO PARA EL ENSAYO DE DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO BAJO COMPRESIÓN.	99
FIG. 3-4 PROGRAMA DE PUESTA EN CARGA PARA LA DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICA.	100
FIG. 3-5 PROGRAMA TIPO DE PUESTA EN CARGA PARA EL MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICA SEGÚN UNE-EN 1352.	100
FIG. 3-6 VISUALIZACIÓN Y REGISTRO DE LOS DATOS DE LAS GALGAS EN EL ENSAYO ESTÁTICO DE COMPRESIÓN.	101
FIG. 3-7 ENSAYO DE DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO A FLEXIÓN.	102
FIG. 3-8 VISUALIZACIÓN Y REGISTRO DE LOS DATOS DE LAS GALGAS EN EL ENSAYO ESTÁTICO A FLEXIÓN.	103
FIG. 3-9 GRÁFICAS DE CARGA Y DEFORMACIÓN A LO LARGO DEL ENSAYO.	103
FIG. 3-10 MARTILLO DE IMPACTO INSTRUMENTADO.	105
FIG. 3-11 ACCELERÓMETROS UNIAxIAL (IZQ.) Y TRIAXIAL (DRCHA.).	105
FIG. 3-12 ANALIZADOR DE FRECUENCIA.	106
FIG. 3-13 SOPORTES.	106

FIG. 3-14	DISPOSITIVO PARA EL ENSAYO POR EL MÉTODO DE RESONANCIA POR IMPACTO.	106
FIG. 3-15	CONFIGURACIÓN DEL PROCESADO DE SEÑAL.	107
FIG. 3-16	ESQUEMA DE LOCALIZACIÓN DEL GOLPEO Y DEL ACELERÓMETRO PARA EL MODO LONGITUDINAL.	108
FIG. 3-17	MEDICIÓN DE LA FRECUENCIA DE RESONANCIA LONGITUDINAL CON ACELERÓMETRO UNIAxIAL.....	109
FIG. 3-18	OBTENCIÓN DE LA FRECUENCIA DE VIBRACIÓN LONGITUDINAL CON ACELERÓMETRO UNIAxIAL.	109
FIG. 3-19	ESQUEMA DE LOCALIZACIÓN DEL GOLPEO Y DEL ACELERÓMETRO PARA EL MODO DE FLEXIÓN.	111
FIG. 3-20	COLOCACIÓN DEL ACELERÓMETRO UNIAxIAL Y LOCALIZACIÓN DEL GOLPEO PARA FRECUENCIA DE FLEXIÓN.	112
FIG. 3-21	OBTENCIÓN DE LA FRECUENCIA DE VIBRACIÓN DE FLEXIÓN CON ACELERÓMETRO UNIAxIAL.	113
FIG. 3-22	COLOCACIÓN DEL ACELERÓMETRO TRIAXIAL Y LOCALIZACIÓN DEL GOLPEO PARA FRECUENCIA DE FLEXIÓN.	114
FIG. 3-23	OBTENCIÓN DE LA FRECUENCIA DE VIBRACIÓN DE FLEXIÓN CON ACELERÓMETRO TRIAXIAL.....	115
FIG. 3-24	ESQUEMA DE LOCALIZACIÓN DEL GOLPEO Y DEL ACELERÓMETRO PARA EL MODO DE TORSIÓN.	119
FIG. 3-25	COLOCACIÓN DEL ACELERÓMETRO UNIAxIAL Y LOCALIZACIÓN DEL GOLPEO PARA FRECUENCIA A TORSIÓN.	119
FIG. 3-26	RESULTADOS DEL ENSAYO. OBTENCIÓN DE LA FRECUENCIA DE VIBRACIÓN A TORSIÓN.....	120
FIG. 3-27	ESPECTRO DE FRECUENCIAS EN EL MODO DE VIBRACIÓN LONGITUDINAL.	122
FIG. 3-28	ESPECTRO DE FRECUENCIAS EN EL MODO DE VIBRACIÓN EN TORSIÓN.	123
FIG. 4-1	COMPARACIÓN DE RESISTENCIAS A COMPRESIÓN Y FLEXIÓN A 28 DÍAS.	134
FIG. 4-2	EVOLUCIÓN DE LA RESISTENCIA DEL MORTERO.....	135
FIG. 4-3	ENSAYO BAJO COMPRESIÓN.....	136
FIG. 4-4	ENSAYO DE FLEXIÓN.....	136
FIG. 4-5	CÁLCULO DE $E_{M,S}$ CON LOS DATOS OBTENIDOS DE LA BANDA EN TRACCIÓN DURANTE EL ENSAYO DE FLEXIÓN.	137
FIG. 4-6	CÁLCULO DE $E_{M,S}$ A PARTIR DE LOS DATOS OBTENIDOS DE LA BANDA EN COMPRESIÓN EN EL MISMO ENSAYO.	137
FIG. 4-7	GRÁFICAS CARACTERÍSTICAS DE DISTINTOS MATERIALES CEMENTOSOS.....	138
FIG. 4-8	EVOLUCIÓN DEL MÓDULO DE DEFORMACIÓN ESTÁTICO SEGÚN EL TIPO DE ENSAYO.	139
FIG. 4-9	VALOR DE $E_{M,S}$ CALCULADO A PARTIR DE LA BANDA EN TRACCIÓN PARA DIFERENTES ANCHOS DE PROBETA.	140
FIG. 4-10	COMPARACIÓN DE VALORES DE $E_{M,S}$ RESPECTO A LAS RESISTENCIAS A FLEXIÓN.	141
FIG. 4-11	COMPARACIÓN DE VALORES DE $E_{M,S}$ RESPECTO A LAS RESISTENCIAS A COMPRESIÓN.	141
FIG. 4-12	MODOS DE VIBRACIÓN DE LA PROBETA DE FORMATO NORMALIZADO 40 x 40 x 160 MM.....	142
FIG. 4-13	VARIACIÓN DE MOE Y G PARA CADA MODO DE VIBRACIÓN EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA DE RESONANCIA....	143
FIG. 4-14	VARIACIÓN DE MOE_{FLEX} EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA DE RESONANCIA Y EL ESPESOR.	144
FIG. 4-15	COMPARACIÓN ENTRE LOS VALORES LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL DE E_D OBTENIDOS CON ENSAYO UNIAxIAL. .	145
FIG. 4-16	MODO LONGITUDINAL.....	146
FIG. 4-17	MODO TRANSVERSAL.....	146
FIG. 4-18	MODO DE TORSIÓN.	146
FIG. 4-19	COMPARACIÓN ENTRE LOS VALORES LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL DE E_D OBTENIDOS CON ENSAYO TRIAXIAL. .	147
FIG. 4-20	COMPARACIÓN DE MÓDULOS PARA DIFERENTES ESPESORES DE PROBETAS.	148
FIG. 4-21	COMPARACIÓN DE FRECUENCIAS DE RESONANCIA PARA DIFERENTES ESPESORES DE PROBETAS.	149
FIG. 4-22	EVOLUCIÓN DE LOS MÓDULOS DE DEFORMACIÓN DINÁMICOS PARA LOS MODOS LONGITUDINAL Y DE FLEXIÓN. .	150
FIG. 4-23	EVOLUCIÓN DEL MOE LONGITUDINAL PARA CADA MUESTRA.	151
FIG. 4-24	RELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE DEFORMACIÓN DINÁMICO Y LA RESISTENCIA A FLEXIÓN DEL MORTERO.	152
FIG. 4-25	RELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE DEFORMACIÓN Y LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN.....	153
FIG. 4-26	COMPARACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE DEFORMACIÓN ESTÁTICO Y DINÁMICO.	154
FIG. 4-27	EVOLUCIÓN DE LA RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO DE LA PROBETA.	155
FIG. 4-28	EVOLUCIÓN DEL MOE LONGITUDINAL EN FUNCIÓN DEL ANCHO DE LA PROBETA.....	156

Introducción general.

La construcción, como cualquier otra actividad humana, experimenta transformaciones a lo largo del tiempo dentro de un proceso adaptativo con base en las mejoras técnicas, la facilidad de ejecución y el coste final. Por este motivo es necesario que los materiales de construcción evolucionen según los nuevos criterios por los que esta se rige.

Uno de estos sistemas recientes, con bloques de hormigón celular revestidos exteriormente con un mortero monocapa, fue utilizado en la edificación de un conjunto de viviendas unifamiliares dentro de un plan parcial al uso en el denominado “boom” de la construcción.

En su concepción sigue el modelo tradicional de muro resistente en fachada o muro de carga pero sustituyendo la fábrica de ladrillo cerámico con junta de mortero por una hoja de bloque de hormigón celular curado en autoclave con junta fina de mortero cola. De esta forma se consigue una mejora muy importante en una función básica de todo cerramiento como es la protección térmica. Finalmente el revestimiento continuo caracteriza la imagen del conjunto y completa la impermeabilización del sistema.

En un plazo corto desde la ejecución, incluso antes de la finalización de las obras, se detectaron fisuras en el revestimiento exterior de las fachadas, de un número importante de viviendas (Fig. 1).



Fig. 1 Detalle de fisuración del mortero de revestimiento.

Aunque la patología detectada no afectaba a su seguridad estructural era preciso, para proceder a su reparación, levantar el revestimiento deteriorado y aplicar una nueva capa de mortero. Esto supuso un importante coste económico y resultó imprescindible realizar un

estudio pormenorizado de las causas que provocaron los daños a fin de determinar la responsabilidad sobre los mismos.

En un primer diagnóstico, por el aspecto y dirección de las fisuras muy lineales y marcadas sin apenas ramificaciones, se pensó que eran de tipo mecánico y se asociaron a incompatibilidades con las deformaciones del soporte. Al ser un sistema constructivo con dos componentes se acotó el problema a comprobar las prestaciones declaradas por cada uno de ellos en busca de algún defecto del material.

Así, por un lado fue preciso conocer la resistencia del bloque de hormigón aligerado, dado que valores bajos pueden provocar deformaciones incompatibles con el revestimiento. En el otro lado, necesitábamos conocer el módulo de deformación del mortero para compararlo con el valor que exigía el fabricante del bloque para asegurar las prestaciones del sistema, una rigidez elevada del revestimiento puede ocasionar su fisuración.

Este trabajo se centra en determinar el módulo de deformación dinámico del mortero de revestimiento puesto en obra siguiendo el mismo procedimiento de ensayo (ASTM-C215, 2008) propuesto por el fabricante (DIT_plus:543p/09, 2009).

Dicho método posibilita el cálculo del módulo de deformación dinámico aplicando una vibración a una probeta del material mediante impacto haciendo uso de la relación entre la frecuencia natural de vibración de un cuerpo sólido y sus propiedades elásticas (Picket, 1945). Por lo tanto, conociendo la densidad de una muestra con dimensiones dadas es posible calcular las constantes dinámicas del módulo de Young, del módulo de cizalladura y del coeficiente de Poisson mediante la medición de la frecuencia natural (resonancia). Una descripción detallada de los fundamentos del método de frecuencia de resonancia y su aplicación se describen en varias referencias (Jones, 1962; Malhotra & Sivasundaram, 2004), (Ide, 1935; Philleo, 1955).

Este método se basa en la medición de la frecuencia de resonancia por impacto y es básicamente un procedimiento de laboratorio difícilmente trasladable a obra. Para solventar este inconveniente se van a correlacionar las probetas preparadas de formato normalizado y no normalizado, con muestras extraídas en obra de bloques de hormigón celular revestidos con mortero (Fig. 2).

El problema se presenta por la ausencia general de datos sobre el módulo de deformación en morteros y más aún en el caso particular de su uso como revestimiento, siendo por ello habitual recurrir a ensayos en hormigón (Lydon & Balendran, 1986). En este sentido, diversos estudios avalan la tesis de utilizar el procedimiento de ensayo descrito en la norma C215 para hormigón con muestras de mortero elaboradas en laboratorio (Haach, Carrazedo, Oliveira, & Corrêa, 2013) con diferentes tamaños y formas, tanto cilíndricas como prismáticas.



Fig. 2 Extracción de bloque de fachada para la elaboración de muestras de mortero *in situ*.

Aun así hay todavía pocos estudios sobre la evaluación de la resistencia a la compresión del mortero de revestimiento a partir de muestras recogidas *in situ* (Soares, Flores-Colen, & De Brito, 2015). El inconveniente reside en esta ocasión en que estas muestras no representan rigurosamente al mortero puesto en obra debido a la eliminación de un cierto número de variables como el contacto con la superficie del bloque, o bien porque el proceso de compactación del mortero de revestimiento aplicado sobre una superficie difiere de la utilizada en las muestras de laboratorio. Además el corte de las piezas durante el proceso de extracción (Fig. 2) altera sus propiedades mecánicas y proporciona formatos irregulares.

En adelante se intentará dar una visión general sobre las posibilidades de aplicar este procedimiento de ensayo no destructivo a la determinación del módulo de deformación de un mortero puesto en obra siguiendo el esquema que se recoge en la página siguiente. Para ello será necesario realizar un mínimo de ensayos complementarios que nos sirvan para verificar y precisar la correlación entre los resultados de este ensayo y las condiciones reales.

Proceso para determinar el módulo de deformación dinámico.

Paso 1 OBTENCIÓN DE MUESTRAS.

Muestras de laboratorio (UNE-EN 1015-11)

Muestras *in situ*



Paso 2 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.

Ensayos normalizados

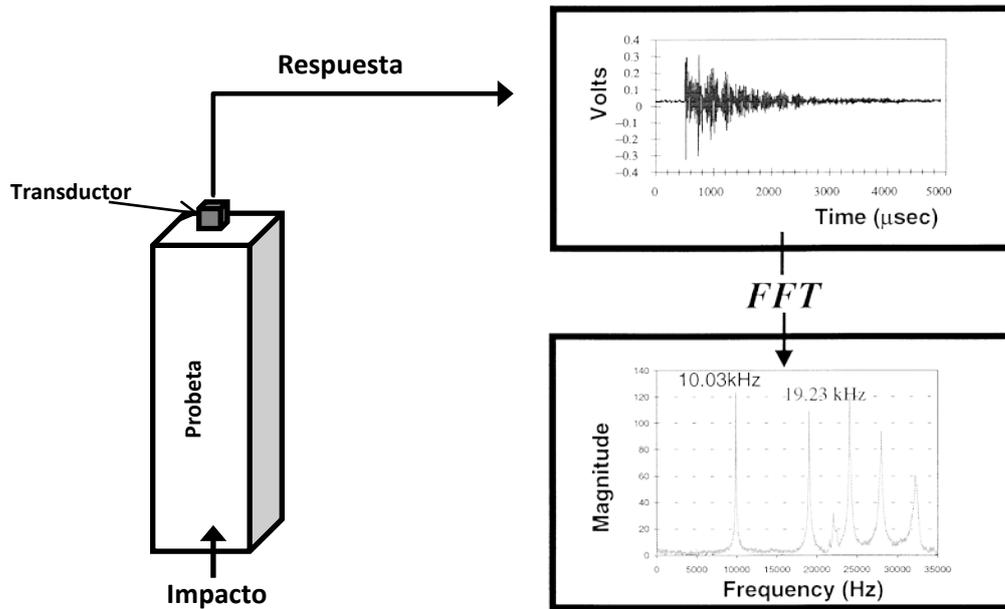
Análisis numérico



Paso 3 DETERMINACIÓN DE LAS CONSTANTES ELÁSTICAS (ASTM C215).

Peso y tamaño de la probeta

Medición de la frecuencia de resonancia: Modos 1, 2, 3 y 6



Cálculo del MOE_{long}

Cálculo de G

Calculo de ν

Cálculo de MOE_{flex}



Paso 4 Verificación del procedimiento sobre muestras *in situ*.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM-C215. (2008). Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens. *Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials*.
- DIT_plus:543p/09. (2009). Documento de Idoneidad Técnica plus: N.º 543p/09. Morteo monocapa para revestimiento de fachadas ONEXIT MONOCAPA UNIVERSAL. *Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja*.
- Drdácký, M. (2011). Non-standard testing of mechanical characteristics of historic mortars. *International Journal of Architectural Heritage*, 5(4-5), 383-394. doi: 10.1080/15583051003717788
- Haach, V. G., Carrazedo, R., Oliveira, L. M. F., & Corrêa, M. R. S. (2013). Application of acoustic tests to mechanical characterization of masonry mortars. *NDT and E International*, 59, 18-24. doi: 10.1016/j.ndteint.2013.04.013
- Ide, J. M. (1935). Some dynamic methods for determination of Young's modulus. *Review of Scientific Instruments*, 6(10), 296-298. doi: 10.1063/1.1751876
- Jones, R. (1962). *Non-destructive Testing of Concrete*.
- Lydon, F. D., & Balendran, R. V. (1986). Some observations on elastic properties of plain concrete. *Cement and Concrete Research*, 16(3), 314-324. doi: 10.1016/0008-8846(86)90106-7
- Malhotra, V. M., & Sivasundaram, V. (2004). Resonant frequency methods. *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, 71-721.
- Philleo, R. E. (1955). Comparison of Results of Three Methods for Determining Young's Modulus of Elasticity of Concrete. *Journal Proceedings*, 51(1), 461-470. doi: 10.14359/11690
- Picket, G. (1945). Equations for Computing Elastic Constants from Flexural and Torsional Resonant Frequencies of Vibration of Prisms and Cylinders. *Proceedings of the American Society for Testing and Materials. Portland Cement Association, Vol. 45*, 846-865.
- Soares, A., Flores-Colen, I., & De Brito, J. (2015). Use of non-standard specimens to study the compressive strength of multi-coat renders. *Journal of Testing and Evaluation*, 43(5), 1055-1065. doi: 10.1520/JTE20140028
- Válek, J., Hughes, J. J., & Groot, C. J. W. P. (2013) Historic mortars: Characterisation, assessment and repair. A state-of-the-art summary. *Vol. 7. RILEM Bookseries* (pp. 1-12).

Estado del arte.

1.1. INTRODUCCIÓN	9
1.2. MORTEROS MONOCAPA	10
1.2.1. CLASIFICACIÓN	10
1.2.2. COMPOSICIÓN	11
1.2.3. DOSIFICACIONES.....	16
1.2.4. CARACTERÍSTICAS DEL MORTERO FRESCO.....	17
1.2.5. PROPIEDADES DEL MORTERO ENDURECIDO.....	19
1.2.6. REQUISITOS.....	21
1.2.7. APLICACIÓN.....	23
1.3. RESISTENCIA MECÁNICA	24
1.3.1. RELACIÓN AGUA/CEMENTO, A/C.....	25
1.3.2. ÁRIDOS, CARGAS MINERALES Y ADITIVOS	26
1.3.3. CURADO	26
1.3.4. RETRACCIÓN.....	27
1.3.5. POROSIDAD	27
1.3.6. RESISTENCIA A LA FISURACIÓN	28
1.4. MÓDULO DE DEFORMACIÓN	29
1.4.1. CONSTANTES ELÁSTICAS	29
1.4.2. MÓDULO DE DEFORMACIÓN ESTÁTICO, E_M	31
1.4.3. MÓDULO DE DEFORMACIÓN DINÁMICO, E_D	34
1.5. MÓDULO DE POISSON, N	39
1.6. EFECTO TAMAÑO	40
1.7. ANÁLISIS NUMÉRICO	41
1.7.1. MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS	41

En este capítulo se hace una mención a los aspectos fundamentales relacionados con la materia que se desarrolla en este trabajo y a la situación general de la investigación pasada y presente desarrollada en torno a la determinación del módulo de elasticidad dinámico en morteros monocapa.

1.1. Introducción.

Los cerramientos tanto interiores como exteriores, suelen estar formados por piezas de pequeño tamaño que, por sí mismas, no prestan habitualmente todos los requerimientos térmicos, acústicos, de protección frente a los agentes atmosféricos y estéticos exigidos. Por regla general, deben ser vestidos por otro material llamado revestimiento.

Para esta función han sido comúnmente utilizados morteros que componen una capa continua de terminación, sin juntas, del paramento de fábrica capaz de aportar estas mejoras técnicas y estéticas y donde la compatibilidad con el soporte es fundamental. Normalmente constituyen el acabado de la superficie, pero también pueden servir como base de otros materiales de acabado, léase pinturas por ejemplo.

Este conjunto de soporte y capa de revestimiento tradicionalmente se ha resuelto con fábricas de ladrillo de diferentes formatos y revocos o enfoscados de mortero a base de cal o cemento o una mezcla de ambos (morteros bastardos). Sin embargo, en la construcción moderna estos sistemas tradicionales se han ido sustituyendo paulatinamente por otros más novedosos con la idea general de mejorar algunas de sus funciones básicas o simplemente de economizar costes, dentro de un proceso adaptivo (Juenger, Winnefeld, Provis, & Ideker, 2011).

En cualquier caso, los distintos revestimientos empleados en estos sistemas constructivos se denominan según los componentes de la mezcla y el lugar y modo de utilización de la misma. Así hablaremos de revocos, cuando nos referimos a terminaciones de fachada con morteros de cal o con morteros mixtos o bastardos (cal y cemento), de enfoscados cuando se realiza con un mortero de cemento, más habitual como soporte a su vez para otro tipo de revestimientos o de pinturas o de morteros monocapa compuestos por un conglomerante hidráulico (preparado o sintético), agua, y un árido de granulometría muy cuidada que llega a la obra en polvo y al que sólo queda añadirle agua.

1.2. Morteros monocapa.

Surgen como respuesta a la demanda de la construcción actual de técnicas y productos de producción controlada y de aplicación rápida, que requieran poca mano de obra y que ésta no sea necesariamente de alta calificación (Scrivener & Kirkpatrick, 2008). Al ser un mortero predosificado industrialmente, compuesto principalmente por cemento, aditivos, áridos, y fibras, al que únicamente se le añade agua en obra y, dado que su colocación se realiza en una sola capa de unos 15 mm de espesor, se reducen los tiempos de ejecución y la necesidad de elementos auxiliares como andamios (Hernández-Olivares & Mayor-Lobo, 2011).

Por el contrario, el empleo de los morteros tradicionales hechos en obra, requiere actualmente un gran esfuerzo de fabricación y control para alcanzar las nuevas exigencias demandadas por la reglamentación vigente.

En su conjunto posee varias propiedades superiores a los revestimientos continuos convencionales, tales como una mejor trabajabilidad, menor fisuración y mayor adherencia al soporte y resistencia a flexión (Capener, 2006), todas ellas propiedades importantes que mejoran la durabilidad del material y aseguran su correcto funcionamiento.

Estas mejoras se deben en gran parte a ser compuestos preparados en fábrica, lo cual facilita el uso de aditivos que refuerzan y evitan el descuelgue y aumentan la dureza. También se garantiza así la homogeneidad de los morteros, evitando errores en las mezclas, y permitiendo una uniformidad de los colores.

Por su proceso de elaboración es posible obtener grandes cantidades de producto de idéntica dosificación y evaluar con precisión sus características técnicas a partir de su muestreo, lo que permite la posibilidad de seleccionar aquellos que mejor se adaptan a la solución constructiva buscada.

1.2.1. Clasificación.

Se siguen tres criterios para clasificar un mortero para revestimiento, en función de su sistema de fabricación, de su aplicación y del concepto (UNE-EN_998-1, 2010).

En el primer caso hablamos de morteros *in situ* o de morteros industriales, según sus componentes se dosifiquen y mezclen en obra o en fábrica.

En función de sus propiedades y/o aplicación se distinguen morteros de uso corriente (GP), sin características especiales, morteros ligeros (LW), con densidades bajas en estado endurecido y seco, morteros coloreados (CR), morteros monocapa (OC), capaces de cumplir en una capa con las mismas funciones que un sistema multicapa utilizado en exteriores, morteros para renovación (R), poseen una alta permeabilidad al vapor de agua y una reducida absorción de agua por capilaridad y morteros para aislamiento térmico (T).

Por último podemos clasificarlos como morteros diseñados o morteros de receta o prescritos. En el primer caso se elige la composición y el sistema de fabricación para obtener

las propiedades especificadas (concepto de prestación) que son refrendadas por los correspondientes ensayos por parte del fabricante. En el segundo caso sus propiedades dependen de las proporciones declaradas de los componentes (concepto de receta).

1.2.2. Composición.

Los morteros monocapas son un producto industrial elaborado con cemento Portland (gris o blanco) y / o cal hidráulica, áridos, adiciones minerales, microfibras, pigmentos colorantes y aditivos orgánicos como látex, resinas, agentes impermeabilizantes, retenedores de agua y aireantes listos para ser mezclados con agua (Ohama, 1998).

La proporción de los componentes dependen de cada fabricante, de forma que cada mortero puede ser clasificado como un producto único, y el agua óptima para su amasado viene determinada a partir de las recomendaciones técnicas que estos aportan.

Habitualmente se diferencian tres grandes grupos, los que cuentan con cemento como conglomerante, bien sea gris o blanco, los que añaden cal hidráulica y aquellos que además contienen celulosa o microfibras. También es posible encontrar agregados finos silíceos, polvos de piedra caliza, pigmentos colorantes minerales y una gran cantidad de aditivos poliméricos de menor importancia que contribuyen a controlar la reología de la pasta y sirven para mejorar las propiedades del mortero endurecido (Maia, Azenha, Faria, & Figueiras, 2011).

Estos aditivos son sustancias o materiales añadidos, antes o durante la mezcla del mortero, en pequeñas cantidades con relación a la masa del cemento. Su función es aportar a las propiedades del mortero, tanto en estado fresco como endurecido, determinadas modificaciones bien definidas y con carácter permanente. Los aditivos aptos para morteros deben cumplir las exigencias prescritas en la normativa (UNE-EN_934-1, 2009).

La mayor parte de los avances en el comportamiento del mortero monocapa se deben a la influencia de los diferentes componentes minoritarios, la mayor parte orgánicos, que se encuentran en su composición y que actúan durante el proceso de fraguado modificando la retención de agua y el contenido de aire. Así, se hará un tratamiento de ellos por separado según las propiedades que confieren al mortero, conforme a su función principal.

1.2.2.1. Conglomerantes.

El diccionario de la Real Academia de la Lengua¹ distingue entre aglomerante y conglomerante. El aglomerante lo define como el material “*capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por efectos de tipo exclusivamente físico; p. ej., el betún, el barro, la cola, etc*”; y, el conglomerante viene definido como el material “*capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto, originando nuevos compuestos*”, por ejemplo el yeso, la cal, el cemento, las resinas sintéticas, etc.

¹ Real Academia Española, Diccionario de la lengua española, 23.ª ed. Madrid: Espasa, 2014. - See more at: <http://www.rae.es/obras-academicas/diccionarios/diccionario-de-la-lengua-espanola>

El cemento es un conglomerante hidráulico, el más utilizado en edificación, que cuando es amasado con agua forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia. El endurecimiento se debe principalmente a la hidratación de los silicatos de calcio.

Los cementos se designan conforme a norma con el prefijo CEM (UNE-EN_197-1, 2011). Sus componentes principales son el Clinker de cemento Portland, la escoria granulada de alto horno, los materiales puzolánicos, las cenizas volantes, el esquisto calcinado, la caliza y el humo de sílice. Para el caso especial de su uso para albañilería se designan sustituyendo el prefijo CEM por el símbolo MC, estando sus características y composición definidas normativamente (UNE-EN_413-1, 2011).

Las cales utilizadas en los morteros pueden ser aéreas o hidráulicas. Sus especificaciones están también normalizadas (UNE-EN_459-1, 2011). Se tiene preferencia por las hidráulicas, ya que el proceso de fraguado es más rápido que en el caso de la cal aérea y da lugar a productos hidratados, mecánicamente resistentes y estables, tanto al aire como bajo el agua. En general, la cal se usa para mejorar la plasticidad del mortero y aclarar su color.

Todos los fabricantes de morteros monocapa utilizan cemento blanco tipo I 42,5 R. Estos cementos se designan normativamente (UNE_80305, 2012) siguiendo el mismo criterio que para los cementos grises pero omitiendo el prefijo CEM y sustituyéndolo por el prefijo BL, seguido normalmente del sufijo I o II según corresponda. El primero, el BL I es el cemento Portland blanco sin adiciones, y el segundo, el BL II, compuesto.

Las adiciones permitidas son ciertos materiales naturales o no (caliza, dolomía, feldespato, tierra de diatomeas, escoria granulada en horno alto, humo de sílice, arcillas blancas activadas etc.) que actúan, o bien aumentando las propiedades hidráulicas del cemento o mejorando otras propiedades debido a una adecuada granulometría (aumento de la trabajabilidad y retención de agua, disminución de la capilaridad y de la porosidad, reducción de la fisuración, etc.) y siempre que los cementos en los que participen como adiciones conserven el grado de blancura permitido. La clase generalmente utilizada es la 42,5. Cuando los colores no son claros pueden emplearse cementos Portland normales, de color gris, también del tipo I y de la clase 42,5, esto es CEM I 42,5.

En todo caso, es frecuente la mezcla de cemento con cal grasa en diversas proporciones, normalmente 90% cemento y 10% cal grasa, para mejorar la plasticidad del mortero. Con esta mezcla se consigue incrementar la elasticidad y su resistencia a la fisuración provocada por los movimientos diferenciales del soporte.

La proporción del conglomerante sobre el total del mortero seco oscila según los diversos tipos de productos, entre un 45% y un 25%. Los controles que deben garantizarse en su fabricación respecto de las características de los cementos se refieren principalmente al color, a la finura y a los tiempos de principio y fin de fraguado.

1.2.2.2. Los áridos.

Son materiales granulares inorgánicos de tamaño variable. Su naturaleza se define como inerte ya que por sí solos no deben actuar químicamente frente a los componentes del cemento o frente a agentes externos (aire, agua, hielo, etc.). Sin embargo, sí influyen de forma determinante en las propiedades físicas del mortero, al unirse a un conglomerante. En general, no son aceptables áridos que contengan sulfuros oxidables, silicatos inestables o componentes de hierro igualmente inestables (UNE-EN_13139, 2003).

El árido va a ser el esqueleto del revestimiento y condicionará su comportamiento final. Desde el punto de vista de su morfología han de evitarse las formas planas y agujas porque influyen en la docilidad del mortero; las superficies lisas y redondeadas porque influirán en la adherencia con el conglomerante, contrariamente a las superficies angulosas y rugosas que permiten una mejor acomodación y adherencia del mortero. Por otro lado, la granulometría y distribución del tamaño del árido tiene que ser variada de forma que favorezca la compactación entre partículas. A mayor cantidad de granos finos menor será la resistencia y porosidad del mortero. Por último, el grado de porosidad del árido permitirá obtener morteros ligeros (porosidad árido alta) o altamente pesados (porosidad árido nula).

Otro de los rasgos que compete a los áridos se halla en la procedencia y naturaleza del mismo. Así, se distingue entre naturales (arenas y gravas procedentes de ríos y playas), de trituración o de machaqueo (obtenidos a partir de rocas naturales) y artificiales (áridos reciclados y áridos de origen distinto a los naturales). En función de su naturaleza pueden ser agregados silíceos (arenas graníticas, de cuarzo tanto de ríos como de aluviones, también puzolanas y tobas volcánicas), agregados calcáreos (calizas, dolomías y materiales fosilíferos) agregados mixtos y otros agregados como arcillas, fragmentos de cerámica y restos de morteros reutilizados.

En la fabricación de morteros monocapa se utilizan tanto áridos calizos como silicios de granulometría compensada, en proporciones que oscilan entre el 40% y el 75%. Debe controlarse en fábrica especialmente el color y la granulometría, a fin de conseguir la máxima compacidad.

También se emplea como adición o carga mineral el filler calizo, pero su principal función es la de retenedor de humedad para que se disponga de suficiente agua para el fraguado del conglomerante e impartir una mayor untuosidad al mortero.

1.2.2.3. Retenedores de agua.

Aumentan enormemente la capacidad de retención de agua de amasado del mortero impidiendo que la pierda con demasiada rapidez por evaporación o por absorción del soporte, actuando como reservas de esta agua que liberan en función de las necesidades para que el cemento se hidrate convenientemente y desarrolle, de modo adecuado, todas sus propiedades.

Suelen utilizarse polímeros superabsorbentes (PSA) que se ha demostrado contribuyen a reducir los problemas de calidad del mortero (Paiva, Esteves, Cachim, & Ferreira, 2009). También colaboran en esta función las cargas minerales y algunos aireantes.

Por contra, pueden facilitar la segregación y exigir una mayor cantidad de agua para obtener una consistencia correcta, por lo que su dosificación debe controlarse cuidadosamente con proporciones recomendadas entre el 0,1% y el 0,5% en peso del cemento.

1.2.2.4. Aireantes.

Modifican el contenido en aire mediante la introducción dentro de la masa de mortero de pequeñas burbujas de aire de diámetro comprendido entre 10 y 500 micras durante el amasado.

Los aireantes le confieren dos propiedades principales, una en su estado fresco dándole mayor fluidez, y otra en el mortero endurecido dándole mayor durabilidad. En el primer caso el aire ocluido actúa como fino que no absorbe agua y como rodamiento de bolas elástico que mejora el deslizamiento entre los áridos.

En el segundo caso resultan muy eficaces contra la succión capilar de agua ya que, por un lado, la rotura de los capilares dificulta la entrada de agua, contribuyendo de esta manera a la impermeabilización y a mejorar el comportamiento de los morteros frente a las heladas y, por otro lado, actúan a modo de recintos de expansión en caso de congelación del agua interior.

Los productos que actúan como aireantes se obtienen de sales de resinas de madera, materiales proteínicos, ácidos derivados del petróleo y algunos detergentes. Entre los más utilizados están la resina Vinsol o abietato sódico, el agua oxigenada (H_2O_2) con hipoclorito de calcio ($Ca(OCl)_2$), que produce burbujas de oxígeno, el ácido clorhídrico (ClH) con bicarbonato de cal ($(CO_3H)_2Ca$) que produce burbujas de gas carbónico y polvos metálicos de aluminio, de zinc, de magnesio, etc...

También se usan lignosulfonatos, obtenidos a la par que la celulosa, al tratar a la madera con bisulfito. Se trata de un polímero de masa molecular elevada que se emplea en dosificaciones del 0,1 al 0,3% en peso del cemento, ya que es un producto tenso-activo de gran efectividad.

1.2.2.5. Plastificantes.

Aumentan la docilidad del mortero en estado fresco. La acción plastificante se identifica con la de los reductores de agua y se consigue mediante la dispersión temporal de las partículas de cemento, que origina una disminución de la relación agua/cemento y un aumento de la plasticidad del mortero permaneciendo la mezcla trabajable durante un mayor período de tiempo.

La consecuencia de este efecto es doblemente importante en los morteros de revestimiento, ya que por un lado aumenta la compacidad al disminuir el agua de amasado, incrementándose la resistencia mecánica, y por otro lado la mayor cohesividad interna hace a los morteros más impermeables al agua líquida.

Son productos orgánicos de moléculas complejas que comparten una parte hidrófoba (repele a las moléculas de agua), formada por un núcleo bencénico y una larga cadena hidrocarbonada, y una parte hidrófila (atrae a las moléculas de agua), constituida por un grupo del tipo carboxilato o sulfonato. Los más empleados tradicionalmente son jabones de resina o abietato alcalino, obtenidos por tratamiento de resinas vegetales, lignosulfonato sódico o cálcico, subproducto de la fabricación de la pasta de papel, sulfonatos sintéticos y sal de hidrocarburo sulfonado, subproducto del tratamiento de los petróleos.

En general son más eficaces cuanto más seco es el mortero y más baja es la relación agua/cemento. Su dosificación suele ser del 0,2 al 0,5% del peso de cemento.

Aunque se recomienda que se disuelvan previamente en agua, esto no parece aconsejable en la preparación de morteros secos y resulta preferible el empleo de plastificantes en polvo mezclados en el proceso de fabricación.

1.2.2.6. Hidrófugos de masa.

Minimizan la absorción de agua por los capilares del mortero endurecido. Entendida correctamente no significa que el mortero endurecido carezca de porosidad capilar, sino por el contrario que, manteniendo abierta su red capilar a la transpiración del edificio, impida el transporte del agua líquida del exterior al interior, por una parte y, por otra, la succión capilar desde la base o zócalo de los paramentos que protege.

Bajo estas premisas, los morteros monocapa de nueva generación incorporan un hidrófugo en masa de base siloxano, alcoxiloxano o compuestos silicio orgánicos, además de soluciones poliméricas, que les confieren una extraordinaria durabilidad al paso del tiempo, manteniendo su total permeabilidad al paso del vapor de agua.

1.2.2.7. Retardantes.

Consiguen retrasar el tiempo de fraguado del cemento, de modo que aumenta el periodo necesario para que los morteros pasen del estado plástico al estado sólido, prolongando de este modo el tiempo de trabajabilidad del mortero. Esto supone una ventaja añadida, por ejemplo, cuando las temperaturas son elevadas o cuando hay que transportarlos a largas distancias.

El empleo de retardadores es delicado pues, si se usan en dosis incorrectas, pueden inhibir el fraguado y endurecimiento del mortero. Aditivos con otra función principal, como la mayor parte de los plastificantes, provocan un ligero retraso en el inicio del fraguado como función secundaria.

1.2.2.8. Resinas.

Aportan principalmente adherencia química, elasticidad y mejoran la impermeabilidad. Se definen como ligantes orgánicos poliméricos.

Para que la función de todos estos aditivos sea realmente eficaz y para evitar efectos no deseados, es imprescindible asegurar cuantitativa y cualitativamente una adecuada mezcla de todos los componentes. Una de las ventajas del mortero monocapa, debido al proceso industrial propio de su fabricación, es garantizar al máximo la correcta dosificación de aditivos, así como su dispersión y homogeneización en la masa del mortero gracias a su amasado en seco.

1.2.2.9. Adiciones.

Las adiciones son materiales preferentemente inorgánicos que finamente divididos se pueden utilizar en la fabricación de morteros con el fin de mejorar ciertas propiedades o conseguir propiedades especiales.

Se incluyen las adiciones inorgánicas que se utilizan como pigmentos, como muchos óxidos metálicos naturales o sintéticos, también cumplen estas condiciones otros pigmentos sintéticos y tierras coloreadas. Con proporciones del 2 al 3% sobre la cantidad de cemento en peso, se consiguen coloraciones aceptables.

También es habitual incluir áridos ligeros (perlita, vermiculita, perlas de poliestireno expandido, piedra pómez, etc.) que reducen la densidad del mortero y su módulo de elasticidad. Adicionalmente pueden mejorar la capacidad aislante de la envolvente térmica del edificio.

Por último, es posible añadir fibras a los morteros monocapa. Se incorporan para mejorar la resistencia al descuelgue (tixotropía) y a la rotura por impacto o retracción de secado. También contribuyen a evitar la fisuración como consecuencia de los movimientos diferenciales del soporte. En todo caso se deben utilizar fibras cortas, en fracciones volumétricas pequeñas. Las fibras de vidrio pueden dar problemas de adherencia a largo plazo, aunque son las más indicadas. También se recomienda el uso de fibras poliméricas, especialmente las de polipropileno, polietileno y nylon. Teniendo en cuenta que el espesor de la capa de mortero oscila entre 12 y 15 mm, la longitud de las fibras no debe superar los 10 mm. Las fracciones volumétricas no deben ser mayores del 0,1%.

1.2.3. Dosificaciones.

El término dosificación define la proporción en volumen o en masa de los diferentes materiales que hemos visto, componen el mortero (conglomerante, árido, aditivo, adiciones y agua) y va a depender de la finalidad para la que está prescrito, de su composición y de la resistencia mínima deseada.

Generalmente la dosificación viene expresada como la razón entre el aglomerante y el árido. Normalmente, en morteros tradicionales, la más frecuente es 1:3, que ha sido la empleada por algunos estándares, aunque también se han utilizado dosificaciones en el rango de 1:1 a 1:10, hablándose de morteros ricos, ordinarios o pobres en la medida que disminuye la proporción de cemento.

Si se utiliza cal las proporciones de conglomerante/árido varían entre 1:1, 1:2, 1:3 y 1:5 (Bofill, Blanco, Lombillo, Villegas, & Thomas, 2014). En cambio, en morteros de matriz polimérica las dosificaciones son más dispares, desde 1:0,5 hasta 1:8.

No menos importante es la relación agua/cemento que debe limitarse al mínimo estrictamente necesario. El agua en exceso se evapora y crea una estructura porosa en el mortero, disminuyendo su resistencia. Por el contrario, un déficit de agua de amasado origina masas pocos trabajables y de difícil colocación en obra.

1.2.4. Características del mortero fresco.

Se refieren a la fase del mortero una vez mezclado y amasado. Su duración varía de acuerdo con el tiempo de fraguado que, a su vez, vendrá determinado por la proporción que integra la mezcla, así como por la temperatura, humedad, etc.

En esta etapa el mortero es plástico y trabajable, lo que permite su puesta en obra. Superada esta fase el mortero endurece hasta consolidarse. Por ello, es preciso diferenciar diversas propiedades y exigencias en función del estado en que se encuentre.

Las propiedades relativas al estado fresco se relacionan con la puesta en obra e influirán principalmente en el rendimiento y la calidad de la ejecución. Los requisitos derivados, por tanto, responden a las exigencias de constructores y operarios.

1.2.4.1. Consistencia.

La consistencia de un mortero define la manejabilidad o trabajabilidad del mismo. La consistencia adecuada se consigue en obra mediante la adición de cierta cantidad de agua que varía en función de la granulometría del mortero, cantidad de finos, empleo de aditivos, absorción de agua de la base sobre la que se aplica, así como de las condiciones ambientales, gusto de los operarios que lo utilizan, etc. La trabajabilidad mejora con la adición de cal, plastificantes o aireantes.

La consistencia se determina por el procedimiento de ensayo llamado de la *mesa de sacudidas*, (UNE-EN_1015-3, 2003).

Se distinguen tres tipos de consistencia: seca, plástica y fluida. La trabajabilidad se logra con morteros de consistencia plástica.

1.2.4.2. Densidad del mortero fresco.

La densidad del mortero está directamente relacionada con la de sus materiales componentes, así como con su contenido en aire. El procedimiento de ensayo para determinar la densidad del mortero fresco está normalizado (UNE-EN_1015-6, 1999).

Los morteros ligeros son trabajables durante más tiempo y se consiguen usando áridos artificiales ligeros (arcilla expandida) o, más comúnmente, añadiendo aditivos aireantes.

1.2.4.3. Adherencia.

Es debida a las propiedades reológicas de la pasta del conglomerante. Un mortero fresco debe tener la capacidad de adherirse al paramento en que es aplicado.

La adherencia, antes de que el mortero endurezca, se incrementa cuanto mayor es la proporción del conglomerante o la cantidad de finos arcillosos. Sin embargo, el exceso de estos componentes puede perjudicar otras propiedades.

Depende del poder de retención de agua del material, de las características de rugosidad del soporte, de su preparación, limpieza, humidificación etc.

1.2.4.4. Capacidad de retención de agua.

La trabajabilidad del mortero fresco también depende de esta propiedad y se entiende como la capacidad de mantenerse húmedo. La retención de agua se halla íntimamente relacionada con la superficie específica de las partículas de árido fino, así como con el conglomerante y, en general, con la viscosidad de la pasta. Un mortero tiende a conservar el agua precisa para hidratar la superficie de las partículas del conglomerante y del árido, así como las burbujas de aire ocluido. El agua que tenga en exceso la cederá fácilmente por succión del soporte sobre el que se aplica.

La retención de agua influye en el grado de hidratación del conglomerante, lo que determinará el ritmo de endurecimiento del mortero. Se mide conforme a norma (UNE-EN_413-2, 2006).

1.2.4.5. Tiempo de utilización.

Es el tiempo durante el cual un mortero posee la suficiente trabajabilidad para ser utilizado sin la necesidad de adición posterior de agua con el fin de contrarrestar los efectos de endurecimiento por el principio del fraguado

Responde al tiempo en minutos a partir del cual un mortero alcanza un límite definido de resistencia a ser penetrado con una sonda, conforme a un procedimiento normalizado (UNE-EN_1015-9, 2000). Todas las características del mortero en estado fresco han de mantenerse durante este tiempo

1.2.5. Propiedades del mortero endurecido.

Es necesario conocer las propiedades del mortero para poder entender cómo va a ser su comportamiento en el tiempo, una vez colocado en obra, en función de los agentes físicos a los que va a estar sometido y así garantizar una adecuada durabilidad.

Todas estas propiedades que se van a mencionar están relacionadas entre sí en mayor o menor medida y dependen de la presencia o proporción de ciertos componentes o aditivos en la mezcla.

1.2.5.1. Densidad.

Una de las primeras propiedades que resulta afectada y que deberemos determinar es la densidad que evoluciona conjuntamente a la porosidad y al coeficiente de absorción y está estrechamente relacionada con la proporción agua/cemento empleada (Hernández-Olivares & Mayor-Lobo, 2011).

La mecánica para su determinación es sencilla, una vez las probetas se han estabilizado en las condiciones del laboratorio se obtiene el peso inicial en gramos. A continuación se introducen en estufa a 105 °C hasta conseguir el peso seco. Luego se introducen en agua y se mide el peso saturado y por último el peso sumergido, según se recoge normativamente (UNE-EN_1015-10, 2000).

1.2.5.2. Resistencia mecánica.

Para prescribir el mortero que mejor se adecua a cada proyecto, es habitual referirse a sus propiedades mecánicas, principalmente la resistencia a compresión y también la resistencia a flexotracción. Estas resistencias se obtienen conforme a los resultados del ensayo de probetas prismáticas de 40 x 40 x 160 mm de 28 días de edad y conservadas en laboratorio según condiciones normalizadas (UNE-EN_1015-11, 2000).

En esta ocasión se realiza primeramente un ensayo de flexión en tres puntos con una velocidad de carga moderada y se anota la fuerza que provoca la rotura de la probeta. Posteriormente se ensayan a compresión las dos mitades resultantes y se toma también el dato de carga de rotura. Así obtenemos valores que servirán para comparar razonablemente diferentes morteros entre sí.

Resulta cada vez más importante, al objeto de compatibilizar las deformaciones con el soporte, hacer referencia también a sus propiedades elásticas, principalmente al módulo de deformación o módulo de Young, sobre el que debatiremos ampliamente.

1.2.5.3. Adherencia.

También es obligado en morteros para revestimiento conocer su adherencia, es decir la resistencia a tracción de la unión con el soporte. Esta propiedad se determina por un ensayo de arrancamiento por carga directa perpendicular a la superficie del mortero, la resistencia a la

adhesión es la relación entre el valor de la carga de rotura y el área de la superficie de ensayo (UNE-EN_1015-12, 2000).

1.2.5.4. Retracción.

Durante el proceso de fraguado y principio de endurecimiento el mortero, y también el hormigón, experimenta una contracción por disminución de volumen provocada por la pérdida de agua sobrante tras la hidratación del cemento, bien por evaporación o por absorción del soporte. A dicha propiedad se le conoce como retracción.

Este fenómeno tiene dos orígenes bien diferenciados, que dan lugar a dos tipos de retracción, la retracción térmica y la retracción hidráulica o de secado.

La primera se debe a la hidratación de los compuestos anhidros del cemento que eleva la temperatura interna pero que finalmente pasa al medio, con el consiguiente enfriamiento y retracción del mortero. La segunda tiene su origen en la pérdida de agua de amasado por evaporación. Parte de esta agua se encuentra en poros, y su evaporación origina una presión negativa, que es la causante de esta disminución de volumen.

1.2.5.5. Impermeabilidad.

Un revestimiento consigue un grado de impermeabilidad óptimo cuando no se forman fisuras en el mismo, posee un nivel adecuado de absorción de agua y su adherencia al soporte es buena.

Los morteros monocapa forman una barrera física que reduce la velocidad de penetración del agua de lluvia por la fachada, pero que no impide totalmente su paso, no son estancos. Normalmente la cantidad de agua absorbida durante el periodo de lluvia se elimina a continuación en fase vapor durante el secado.

Pero al mismo tiempo deben permitir la evacuación del agua que normalmente se forma en el interior del edificio. Ambos parámetros absorción y permeabilidad al vapor condicionan el grado de impermeabilidad de un revoco.

El primero de ellos depende de la estructura capilar del material, de manera que cuanto más compacto es un mortero, menor será la red capilar y, en consecuencia, más impermeable resultará. La incorporación de aditivos hidrofugantes, plastificantes y aireantes contribuye notablemente a disminuir la absorción capilar.

1.2.5.6. Comportamiento ante el fuego.

Por último se deberá evaluar la reacción frente al fuego de los morteros de revestimiento en función de la fracción en masa o en volumen de aquellos materiales orgánicos distribuidos homogéneamente en su composición. En general, si la fracción es $\leq 1,0\%$, se les podrá asignar una clase A1 de reacción frente al fuego, sin necesidad de la realización de ensayos.

1.2.6. Requisitos.

Los morteros para revoco y enlucido se designarán conforme a las características de resistencia a compresión a 28 días, CS, en N/mm^2 , de absorción de agua por capilaridad, W, en $\text{kg/m}^2 \text{min}^{0,5}$ y de conductividad térmica (en el caso de morteros para revoco/enlucido para aislamiento térmico), T, en $\text{W/m}\cdot\text{K}$ de acuerdo a una tipificación normalizada (UNE-EN_998-1, 2010) que debe figurar en el marcado CE².

La designación se hace en base a estas tres propiedades del mortero endurecido con distintos niveles (Tabla 1–1).

Propiedades	Categorías	Valores
Intervalo de resistencia compresión a 28 días	CS I	0,4 a 2,5 N/mm^2
	CS II	1,5 a 5,0 N/mm^2
	CS III	3,5 a 7,5 N/mm^2
	CS IV	$\geq 6 \text{ N/mm}^2$
Absorción de agua por capilaridad	W 0	No especificado
	W 1	$C \leq 0,40 \text{ kg/m}^2 \text{min}^{0,5}$
	W 2	$C \leq 0,20 \text{ kg/m}^2 \text{min}^{0,5}$
Conductividad térmica	T 1	$\leq 0,1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
	T 2	$\leq 0,2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

Tabla 1–1 Clasificación de las propiedades del mortero endurecido según UNE-EN 998-1.

Los morteros de clases CS I y CS II se destinan a uso interior. Son morteros menos cohesionados, no adecuados para soportar cambios ambientales bruscos o extremos. Los morteros de clase CS III y clase CS IV son aptos para el uso exterior, su dosificación rica en conglomerante facilita una masa más cohesionada y una mejor respuesta a cambios ambientales.

Un mortero para revoco monocapa de resistencia a compresión 5 N/mm^2 (CS III) y absorción de agua 0,3 $\text{kg/m}^2 \text{min}^{0,5}$ (W1) se identifica como:

CS III - W1

Opcionalmente puede anteponerse a la designación el Código correspondiente a su uso. En ese caso, el mortero anterior se identifica del modo siguiente:

OC CSIII - W1

La elección del mortero se debe hacer teniendo en cuenta el paramento, la naturaleza y el nivel de exposición al que va a estar sometido, los requisitos funcionales, tales como resistencia a la penetración de agua, efecto de la heladicidad, efecto de la contaminación,

² Marcado-CE es una norma europea de normalización realizada por el C.E.N., Comité Europeo de Normalización, y editada en España por A.E.N.O.R.

resistencia a la abrasión, aislamiento térmico, etc., el tipo de revoco, los requisitos estéticos, la compatibilidad con los demás elementos de la unidad de obra y el modo de aplicación, manual o mecánica.

Además, la selección se ha de completar con la decisión del tipo de composición (mortero de cemento, mixto de cemento y cal o de cal) y, si es necesario, se especificarán propiedades o características adicionales (consistencia, tiempo de retardo de fraguado, tiempo de utilización, contenido en aire, etc.).

Con arreglo a las exigencias del Código Técnico de la Edificación, CTE, en la Tabla 1–2 se presentan los requisitos mínimos que tienen que cumplir los sistemas constructivos, entre ellos los revestimientos de fachada. En todos los casos, el espesor del mortero no debe ser inferior a 15 mm.

Características	Requisitos
Clase de reacción al fuego	B-s3, d2
Conductividad térmica	Declaración del valor de λ (W/m K)
Factor de resistencia a la difusión del vapor de agua.	Declaración del valor de μ
Clasificación del revestimiento en función de la resistencia a la filtración.	R1 o R3

Tabla 1–2 Requisitos que tiene que cumplir un revestimiento según CTE.

Estos materiales no obstante, son objeto de estudio por la Unión Européenne pour l'Agrement Technique dans la Construction (UEAtc), Organismo Europeo creado en el año 1964, antes de la propia existencia de la CEE, que tiene como finalidad facilitar y estudiar la evaluación de materiales, procedimientos o sistemas de construcción no tradicionales o que impliquen nuevas tecnologías, tanto a través de Directrices o Guías Técnicas como a través de investigaciones generadas en cada Instituto miembro, en el caso español el Instituto "Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento" (IETcc).

La mayor parte de morteros monocapa cuentan con el Documento de Idoneidad Técnica, DIT plus, que constituye una apreciación técnica favorable por parte del IETcc sobre la aptitud de empleo de materiales, sistemas y procedimientos. El DITE, es el documento a nivel europeo.

Otro documento que avala las prestaciones de este tipo de productos es el D.A.U., Documento de Adecuación al Uso. Lo elabora y otorga el Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña – ITeC.

Para evaluar todos los requisitos y propiedades tanto del mortero fresco como endurecido (Kovler & Roussel, 2011), se deberán seguir los procedimientos de ensayo prescritos en la correspondiente norma y que se van a desarrollar en el capítulo dedicado a la caracterización del material.

1.2.7. Aplicación.

Los revestimientos de mortero en general, tanto en interior como en exterior, pueden extenderse a buena vista sobre el paramento sin la ayuda de maestras, quedando el criterio de planicidad establecido por el aplicador, o maestreados si el mortero se aplica sobre el paramento ayudándose de maestras, de modo que estas determinan la planicidad del revestimiento.

De otro modo, pueden aplicarse de modo manual, si el mortero fresco se extiende con la ayuda de una llana, o mecánico (denominada normalmente proyectado), cuando su aplicación se realiza mediante una máquina de proyectar, para ser regularizado posteriormente de forma manual.

En cualquier caso, el espesor óptimo está comprendido entre 10 mm y 20 mm, sin que deba ser inferior a 10 mm en ningún caso. Para espesores superiores a 20 mm, debe realizarse el trabajo en dos veces, colocando una malla resistente a los álcalis en el centro del espesor del raseo. El espesor total nunca debe ser superior a 40 mm. En las uniones de materiales de distinta composición se debe reforzar el revestimiento con malla de fibra de vidrio plastificada, cubriendo unos 15 cm a cada lado de la unión.

Tiene distintas posibilidades de texturas y colores lo que le permite constituir por sí mismo el acabado de fachada que además puede hacerse variar en función de criterios estéticos, eligiéndose entre liso, rústico, tirolesa, raspado, etc. Así, no directamente en su composición pero sí en la fase final de acabado, se puede añadir un árido, generalmente de mármol triturado, pulverizándolo sobre la superficie, de forma que el revestimiento toma la apariencia de un revoco lavado. En otras ocasiones, aunque ya está en desuso, se salpica un árido de diferentes tamaños y colores que realza la textura del revestimiento.

Para la correcta aplicación de los morteros monocapa se deben seguir las instrucciones de uso establecidas por el fabricante que habitualmente están recogidas en distintivos voluntarios de calidad como el DIT o DAU ya mencionados. También se pueden seguir los criterios normalizados en cuanto a especificaciones y recomendaciones para el desarrollo de buenas prácticas en el control de recepción y la puesta en obra de los morteros para revestimientos (UNE_41302-IN, 2013).

1.3. Resistencia mecánica.

La resistencia de los morteros y, en general, de los productos cementosos se utiliza habitualmente como la propiedad más importante a la hora de prescribirlos, aunque, en otros casos, características como la durabilidad y la permeabilidad, pueden llegar ser tan importantes o más, especialmente si hablamos de morteros monocapa.

En los revestimientos continuos se producen pequeños movimientos diferenciales provocados por el soporte, por cambios ambientales e impactos o por agresiones externas que aumentan las tensiones internas y que tienen que ser capaces de soportar sin ver alterada su función principal. Nos estamos refiriendo fundamentalmente a tensiones de compresión o de tracción.

La resistencia a las primeras nos proporciona una idea de la cohesión interna del mortero, es decir, su capacidad de soportar presiones sin disgregarse. Por ello, también se la relaciona con el grado de estanqueidad que será capaz de alcanzar una vez dispuesto.

La resistencia a tracción nos proporciona información sobre la dificultad que oponen las partículas a separarse y nos sirve para predecir, junto al tamaño de los áridos, la energía de fractura (Bažant & Oh, 1983). Como ocurre con el resto de este tipo de materiales, relativamente frágiles, la resistencia a tracción es baja, por lo que debe asegurarse que el mortero de revestimiento no estará expuesto a estas sollicitaciones.

Ambas han sido relacionadas experimentalmente. La resistencia a tracción de un mortero a la edad de referencia de 28 días puede estimarse a partir de la resistencia a compresión (Singh, Munjal, & Thammishetti, 2015),

$$f_{c,t} = 0,21 (\sigma_c)^{0,66} [MPa]$$

Lo cierto es que su medida da una visión global de la calidad de estos productos debido a que la resistencia está directamente relacionada con la estructura de la pasta de cemento hidratado a través de dos mecanismos principales. El primero es la conexión de las partículas de cemento, para el que se aplica un modelo de percolación, dando una buena percepción del tiempo de fraguado. El segundo mecanismo se corresponde con el llenado de poros capilares por los hidratos (Boumiz, Vernet, & Cohen Tenoudji, 1996). Además, influye en otras propiedades con las que se la relaciona.

1.3.1. Relación agua/cemento, a/c.

Dentro de la dosificación de los morteros la relación agua/cemento, que en buena parte determina la trabajabilidad que va a tener la pasta, es uno de los principales parámetros en las normas y especificaciones respecto a la durabilidad y afecta a la evolución de su resistencia (Neville, 2011). Podemos afirmar que habrá una disminución de la resistencia final a la compresión del mortero con el aumento del contenido de agua (Zhou, Chen, Wu, & Kan, 2011).

El exceso de esta produce frecuentemente la exudación, fenómeno por el que el agua de la parte inferior se mueve hacia arriba, especialmente cuando la granulometría tiene gran porcentaje de árido grueso que se deposita en la parte inferior. El resultado es una mezcla no homogénea con una cierta merma de sus propiedades finales.

En esta misma línea Haach et al. (Haach, Vasconcelos, & Loureno, 2011) investigaron la influencia de la granulometría de los áridos y la relación a/c en la trabajabilidad y la resistencia a la compresión del mortero, observando que el aumento de dicha relación aumenta la trabajabilidad, pero reduce el valor de sus propiedades mecánicas. Esta reducción de la resistencia a compresión es extensible a morteros modificados, como los utilizados en revestimientos monocapa, si bien no es tan evidente para la resistencia a flexión (Schulze, 1999).

Gracias a estudios más detallados y adaptando conclusiones obtenidas para el hormigón, ha sido posible establecer una expresión para predecir la resistencia a compresión del mortero en función de la relación agua/cemento y arena/cemento (Rao, 2001b; Singh et al., 2015). La resistencia a compresión, y también a tracción, de un mortero a la edad de 28 días disminuye al aumentar el contenido de arena y la proporción agua/cemento.

Para completar aún más todos estos trabajos se han estudiado por separado las características resistentes de los áridos y el cemento. Las conclusiones relacionan el conglomerante con la trabajabilidad del mortero, mientras que los áridos influyen en sus propiedades mecánicas y ayudan en el control de la retracción (Atiş, Kiliç, & Sevim, 2004).

Puesto que la consistencia se adquiere mediante adición de agua a la masa de arena y conglomerante, esta propiedad se relaciona directamente con la proporción a/c, e indica la trabajabilidad que va a desarrollar una vez puesto en obra. Por tanto, la consistencia de la pasta de mortero es una propiedad crucial para el completo desarrollo de sus propiedades resistentes y su medición en el cono de Abrams resulta tan útil en morteros como lo es en el hormigón.

1.3.2. Áridos, cargas minerales y aditivos

Desde los más antiguos morteros hasta la actualidad los avances técnicos han ido modificando su composición. Si en un principio los morteros se hicieron usando barro, probablemente el tipo más antiguo, yeso y cal (Elsen, 2006), con la introducción del cemento Portland se dio un salto cuantitativo en sus propiedades (Bentur & Mitchell, 2008), hasta tal punto que su producción se ha incrementado exponencialmente en los últimos 80 años, contribuyendo al aumento de las emisiones de CO₂ (Schneider, Romer, Tschudin, & Bolio, 2011).

Buscando un producto más sostenible se han ido incorporando residuos de la industria que paralelamente han introducido mejoras en sus propiedades. Así, se han empleado las cenizas volantes (Naik, Singh, & Ramme, 1998), que además han mejorado la resistencia y durabilidad de los hormigones y morteros (Chindaprasirt, Homwuttiwong, & Sirivatnanon, 2004). También la escoria de alto horno ha sido utilizada desde 1950, con muy buenas prestaciones en ambientes agresivos (Meyer, 2009).

Desde su primer uso en 1970, el humo de sílice se ha convertido en uno de los componentes más valiosos y versátiles del hormigón. Formando parte del mortero se han constatado mejoras significativas en sus propiedades de resistencia inicial (Rao, 2001a).

Estos aditivos y/o adiciones que pueden contener los morteros monocapa, aunque sea en pequeñas cantidades (su proporción no puede superar el 5% del contenido de cemento), influyen notablemente en su resistencia (Capener, 2009). Aunque a veces no sea su función principal, si el aditivo sirve para disminuir la relación a/c, por lo ya expuesto, su uso repercutirá en una mejora de la resistencia. Por contra, la existencia de aire incorporado en el mortero (aire ocluido) por el uso de aditivos aireantes, minora la resistencia de éste.

Para armar la masa del mortero se incorporan fibras de celulosa, que mejoran la capacidad de deformación del material y la resistencia a la tracción. Por su parte, los polímeros aumentan significativamente la resistencia a la flexión, pero pueden presentar inconvenientes. El efecto combinado del aire ocluido y el éter de celulosa reducen la contracción plástica de todas las composiciones, pero aumentan la contracción por secado, debido a sus altos contenidos de aire, repercutiendo en un menor módulo elástico. Su efecto más significativo está relacionado con el transporte del agua interna a través de la red capilar.

1.3.3. Curado.

El curado es un periodo crítico en el proceso de endurecimiento de las pasta de mortero y va a influir directamente en su resistencia final (Chindaprasirt, Chareerat, & Sirivatnanon, 2007).

Un curado adecuado necesita de una disponibilidad permanente de humedad que permita el fraguado en condiciones normales de temperatura y en ausencia de fuerzas externas. Está suficientemente estudiado que la variación del tiempo de curado a temperatura constante o la

variación de la temperatura con un tiempo de curado fijo, afecta a la resistencia del mortero (Bentur & Mitchell, 2008).

En particular, el efecto de la temperatura de curado sobre la resistencia puede ser beneficioso en los primeros días y, sin embargo, perjudicial a largo plazo. Si aumenta, por un lado se favorece la hidratación del cemento, pero por otro se fomenta la porosidad del sistema, debido a la rápida pérdida de agua hacia el entorno y a la disminución de la humedad relativa interior, que afectan a la velocidad de hidratación y, como consecuencia, a la resistencia a largo plazo (Esteves, Cachim, & Ferreira, 2007).

En su puesta en obra los morteros de cemento pueden estar sometidos a condiciones medioambientales adversas, en concreto a temperaturas elevadas y a humedades relativas bajas, lo cual afecta a la evaporación del agua interna. Para mejorar el curado se añaden polímeros superabsorbentes, PSA, con y sin retención de agua, pero pueden tener un efecto similar al descrito, ayudan a mejorar el curado interno durante los primeros días aunque, a largo plazo, la diferente microestructura a que da lugar su presencia, con un mayor número de poros y menores densidades, reducen su característica mecánicas (Paiva et al., 2009).

1.3.4. Retracción.

La pérdida de agua por evaporación, y también por succión capilar del soporte de albañilería, que causa la retracción puede llevar a la fisuración del mortero y la consiguiente reducción en sus prestaciones mecánicas. Este proceso depende del tamaño de la superficie y de las condiciones de exposición del revestimiento (Hossain & Weiss, 2006), de la dosificación del árido y de sus propiedades tanto mecánicas como térmicas (Bisschop & Van Mier, 2002; Zhang, Zakaria, & Hama, 2013) y de la estructura de poros (Scherer, 1990).

1.3.5. Porosidad.

La resistencia a compresión y a flexión del mortero de cemento se ha medido e interpretado en términos de su porosidad obteniéndose buenos resultados (Herve, Care, & Seguin, 2010; Wang, 1984). Los datos experimentales también muestran que la relación entre ambas no es constante, sino que disminuye con el aumento de los valores de porosidad (Chen, Wu, & Zhou, 2013).

Estos autores primero revisaron las relaciones entre porosidad y resistencia existentes (Ryshkewitch, Schiller, Balshin y el modelo Hasselman) y evaluaron su idoneidad. Posteriormente utilizaron el modelo Zheng para materiales porosos para evaluar la relación entre porosidad y resistencia de los morteros de cemento. A partir de los rangos de porosidad examinados, se concluyó que dicho modelo es una buena representación de los datos obtenidos experimentalmente.

1.3.6. Resistencia a la fisuración.

Se denomina fisura a toda apertura longitudinal que afecta sólo a la parte exterior del elemento constructivo. Por contra, grietas engloba la apertura que afecta al elemento en todo su espesor.

La sensibilidad que tiene un revoco al agrietamiento y la fisuración depende, de forma importante, de las tres características siguientes:

- Retracción
- Módulo de elasticidad
- Resistencia a la tracción

Los materiales fabricados con cemento experimentan en el transcurso del fraguado y endurecimiento, retracciones en su masa que provocan tensiones internas, que pueden dar lugar, si estas superan las fuerzas de cohesión, a fisuraciones más o menos pronunciadas que van desde las microfisuras o cuarteamientos a grietas claramente declaradas.

El módulo de elasticidad caracteriza la capacidad de deformación del material endurecido bajo el efecto de las tensiones que actúan sobre él, de forma que es tanto mayor cuanto menos elástico o más rígido sea éste.

Por último la resistencia a la tracción pone de manifiesto la cohesión del material, es decir, la fuerza que se opone a su ruptura.

Cada una de estas características consideradas aisladamente, no permite apreciar la sensibilidad a la fisuración de un revoco. Su comportamiento es el resultado de unir los tres parámetros.

En cuanto a las causas, estas se relacionan o bien con el soporte, o bien con la aplicación del revestimiento. Si el soporte tiene un comportamiento anómalo debido a asentamientos en su cimentación, juntas en fábricas mal ejecutadas, movimientos incompatibles con la estructura, etc..., los revestimientos estarán sometidos a esfuerzos para los que no están diseñados y romperán.

1.4. Módulo de deformación.

Cada vez es más importante prescribir los morteros de acuerdo a sus propiedades elásticas. Por un lado cuando se usan para juntas influyen en el comportamiento de las fábricas de ladrillo o mampostería. Por otro lado, los morteros de revestimiento deben ser compatibles con el soporte sobre el que están aplicados, dado que su funcionalidad está condicionada por la capacidad que tengan de deformarse con él sin fisurarse. Una excesiva rigidez provocaría la aparición de fisuras o agrietamientos y afectaría al comportamiento mecánico que depende de su respuesta, o deformación, a las cargas a que está sometido.

Sin embargo, existen pocas referencias sobre la determinación del módulo de elasticidad en morteros *in situ* y no son muchos más las existentes en hormigón. Una vez que el material está puesto en obra sus propiedades elásticas no pueden ser medidas directamente sin dañarlo. Entonces lo habitual es realizar ensayos estáticos en laboratorio o estimarlo a partir de valores de resistencia de muestras cilíndricas mediante la aplicación de expresiones basadas en datos experimentales, pero esto puede llevar a errores importantes (Jonh S. Popovics, Zemajtis, & Shkolnik, 2008).

1.4.1. Constantes elásticas.

Cuando un cuerpo elástico se somete a una fuerza externa cambia de tamaño o forma, o ambos. Cuando la fuerza se relaja, el cuerpo volverá a su tamaño o forma original, siempre que la fuerza sea menor que un cierto valor crítico.

La fuerza externa ejercida en el cuerpo se denomina carga y la reacción elástica interna opuesta se llama tensión. La tensión en la que aparece el primer estado permanente de deformación determina el límite elástico del cuerpo.

El cambio en el tamaño o forma del cuerpo por unidad de dimensión original se llama deformación. Puede ser un cambio en una dirección lineal, en el ángulo entre las dimensiones lineales, o un cambio en el volumen.

Hooke en 1676 descubrió experimentalmente que, siempre y cuando las tensiones no superaran (o estuvieran muy próximas) el límite elástico, la deformación de un alambre provocada por diferentes pesos suspendidos era proporcional a la carga aplicada.

El módulo de elasticidad se define por la relación tensión deformación cuando está sometido a una carga uniaxial (Neville, 2011) y expresa la resistencia del mismo frente a la deformación (rigidez). Esta relación es, por lo general, constante (lineal) y característica del material para pequeños esfuerzos aplicados, inferiores al correspondiente límite elástico, cumpliéndose en este entorno la ley de Hooke.

Como la deformación es un factor adimensional, el módulo de deformación tiene las mismas dimensiones que la tensión, fuerza por unidad de superficie. En el SI la unidad es el pascal (Pa), aunque a efectos prácticos se utiliza el megapascal (MPa).

Los principales tipos de esfuerzos y sus deformaciones relacionadas son de compresión, de tracción y cortante. Según sea el tipo de esfuerzo y deformación considerados, el módulo de elasticidad recibe una denominación distinta; así, en el caso de esfuerzos y deformaciones longitudinales, recibe el nombre de módulo de Young (E), y de módulo de cizalladura (G), para la deformación por cortante. Además, el coeficiente o relación de Poisson (ν) mide una deformación transversal en comparación a la deformación en la dirección longitudinal de aplicación de la carga.

Para materiales isótropos dicha relación entre el módulo de deformación transversal, el módulo de Young y el coeficiente de Poisson se expresa:

$$E = 2G(1 + \nu)$$

o más habitualmente,

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Realmente el mortero tiene un comportamiento que no es elástico y al aplicar una fuerza obtenemos una respuesta no lineal, incluso aunque simplemente modifiquemos la velocidad de aplicación de la carga. Este comportamiento se observa también en otros materiales no homogéneos, como el hormigón, donde la relación no lineal entre tensión y deformación se ha consensuado a partir de una ecuación de segundo grado (Shkolnik, 2005). Sin embargo, en comparación con el hormigón normal, el mortero de cemento es bastante más homogéneo, con pocas discontinuidades, lo que facilita la investigación.

La medición de las propiedades mecánicas en general se lleva a cabo a través de experimentos de laboratorio de acuerdo con procedimientos normalizados. En el caso específico del módulo elástico, los métodos utilizados pueden ser dinámicos, con vibraciones a través de pequeñas amplitudes de deformación, o estáticos, que someten a la muestra a una tensión conocida y miden simultáneamente la deformación inducida.

Los módulos elásticos determinados dinámicamente mediante la excitación de la probeta, se calculan a partir de la medición de las frecuencias de resonancia en distintos modos de vibración.

1.4.2. Módulo de deformación estático, E_m .

En los métodos estáticos el espécimen se coloca en una máquina de ensayo y se somete a una carga que se incrementa lentamente a una velocidad definida. Entonces la deformación se mide a intervalos regulares, ya sea directamente por un comparador o eléctricamente por medio de una galga extensiométrica.

En estos ensayos el factor tiempo es importante ya que, si es demasiado largo, se puede producir la fluencia del material e invalidar las mediciones. Otros aspectos como la temperatura, el contenido de humedad y las dimensiones, también pueden afectar a la medición. Por este motivo se suele fijar un valor estándar para la aplicación de la carga y el tamaño de las probetas que permita correlacionar los datos.

Además la curva tensión deformación, debido a la histéresis del material, es diferente durante el proceso de carga que cuando se descarga la muestra y además también hay diferencias entre un segundo ciclo y el primero. Por esta razón las constantes elásticas rara vez se obtienen en una única determinación, sino que es necesario ejecutar un cierto número estándar de ciclos para proceder a la medición.

También los valores de los módulos elásticos van a variar con el historial de cargas y por lo tanto es necesario, en la presentación de resultados de las pruebas estáticas, definir las condiciones de tensión precedentes. Esto resulta especialmente importante en el caso de testigos extraídos *in situ*.

En general, los valores de módulo de deformación obtenidos mediante ensayos estáticos están sujetos a mayores variaciones estadísticas, en torno a un 15%, debido a la falta de uniformidad de la carga, a diferencias en la definición de los métodos para su obtención o a los errores debidos al tipo y la ubicación de los aparatos de medida y normalmente mejoran si se utilizan formatos más grandes que muestran una tendencia a una mayor uniformidad.

Las normas de referencia para el cálculo del módulo de deformación estático bajo compresión en hormigón (ASTM-C469, 2010; UNE-EN_1352, 1997) plantean relacionar unos valores de carga dados, el 5% y 40% de la carga de rotura a compresión, con su respectivas deformaciones longitudinales. El módulo de elasticidad del material así medido es el secante Fig. 1-1.

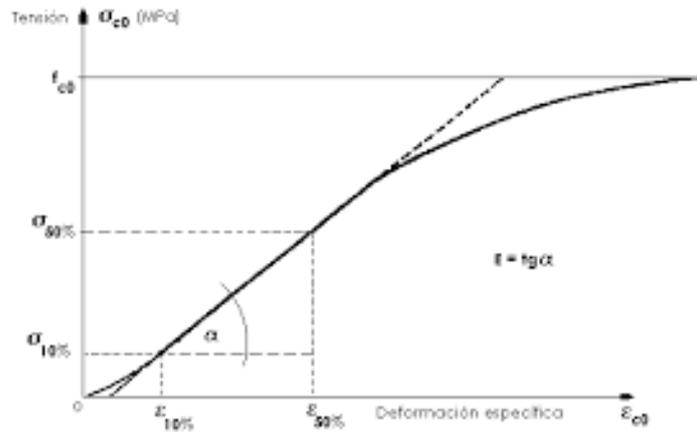


Fig. 1-1 Módulo secante medido sobre el escalón de carga propuesto por la norma de hormigón.

En la adaptación de este procedimiento a especímenes de mortero se toman los mismos escalones de carga y se anotan medidas de deformación sobre probetas cilíndricas o prismáticas instrumentada con galgas extensiométricas situadas paralelamente a su eje longitudinal (Casali et al., 2007).

También es posible obtenerlo midiendo cargas y deformaciones, sobre la probeta instrumentada como se ha explicado anteriormente, en un ensayo clásico de flexión en tres puntos y calcular así la gráfica tensión-deformación (Rosell & Cantalapiedra, 2011). La regresión lineal sobre el máximo tramo de la citada curva tensión-deformación que permita una buena correlación de los datos obtenidos, expresa su valor.

Otras veces se ha seguido una relación similar pero tomando como dato la flecha en el punto medio de especímenes con geometrías esbeltas, medida a partir de un ensayo de flexión en cuatro puntos (Deniz & Erdoğan, 2015).

Pero no siempre las muestras pueden ser sometidas a los procedimientos de ensayo descritos. En ocasiones, sobre todo en la caracterización de morteros históricos donde las muestras que se pueden extraer son de pequeño tamaño y, además, se alejan del formato normalizado, se recurre a prótesis de otro material, principalmente madera, para completar una probeta de dimensiones adecuadas al ensayo que se quiere realizar (Drdácký, 2011; Válek & Veiga, 2005).

1.4.2.1. Relación con la resistencia.

Si admitimos que el mortero de cemento se puede entender como un hormigón especial, entonces la influencia que características como la relación agua/cemento o el contenido y tipo de árido tienen en el comportamiento mecánico y dinámico del hormigón se pueden trasladar a este.

Por ello, los procedimientos de ensayo que se aplican para determinar el módulo de deformación del mortero se pueden adaptar de la normativa existente para hormigón con buenos resultados (Haach, Carrazedo, Oliveira, & Corrêa, 2013).

Así, algunas de las ecuaciones utilizadas para el cálculo del módulo de elasticidad a partir del valor de la resistencia a compresión se han utilizado con éxito para estimar con bastante precisión el módulo de deformación del mortero, si bien se trata de estudios preliminares (Toma, Covatariu, Toma, Taranu, & Budescu, 2013).

Hay ecuaciones de este tipo propuestas en diferentes códigos, algunas con buenos resultados experimentales (ACI_363R-92, 1992),

$$E_c = 3,32\sqrt{f'_c} + 6,9 \text{ [GPa]}$$

válida para resistencias a compresión del hormigón entre 21 y 83 MPa. También las encontramos en la norma británica (BS_8110-85, 1985) o está la propuesta por el Eurocódigo,

$$E_m = 22 \left(\frac{f_c}{10} \right)^{0,3}$$

en este caso válida para rangos del módulo de elasticidad de 12,5 a 25,3 GPa.

En estudios sobre mortero se han aplicado otras expresiones similares para estimar el módulo de elasticidad (BS_5628-1, 1992) o bien de estudios experimentales (Haach et al., 2011),

$$E_m = 2001,18 f_m^{0,53}$$

a partir de la resistencia a compresión. También, de forma más ajustada para el caso de probetas cilíndricas (Haach et al., 2013),

$$E_{static} = 2,83 (f_m)^{2/3}$$

Aun así, para obtener valores consistentes será necesario realizar un mayor número de pruebas estáticas que las necesarias con métodos dinámicos. Por ello son preferibles procedimientos de ensayo no destructivos que se pueden repetir con relativa simplicidad y precisión.

1.4.3. Módulo de deformación dinámico, E_d .

Se obtiene al aplicar, en condiciones dinámicas de carga, una tensión reducida (ensayo no destructivo), con lo que se captan los efectos puramente elásticos del material. El módulo de elasticidad dinámico se corresponde con el módulo tangente inicial de la curva tensión-deformación.

Durante la primera mitad del siglo XX se plantearon, siguiendo la teoría de la elasticidad, las ecuaciones diferenciales y se aproximó la solución para obtener las constantes elásticas de barras de sección rectangular o cilíndrica vibrando con sus extremos libres (Picket, 1945). Estas ecuaciones son válidas para materiales isótropos y homogéneos, con unas determinadas condiciones de contorno y forma, pero han sido extensamente aplicadas con éxito para determinar el módulo de deformación dinámico del hormigón (Haach et al., 2013).

A diferencia de E_m , el módulo de elasticidad dinámico no se puede obtener directamente a partir de ensayos bajo compresión de un cilindro normalizado. Existen fundamentalmente dos procedimientos para calcular E_d , midiendo la velocidad de propagación del sonido a través de la probeta de ensayo o bien por medida de la resonancia inducida por excitación acústica o por impacto.

La medida del módulo de Young dinámico por ultrasonidos se perfila como procedimiento a considerar para evaluar la calidad de un mortero monocapa, en cuanto a su previsible fisuración (Hernández-Olivares & Mayor-Lobo, 2011). El método, sin embargo, tiene importantes limitaciones ya que se ve afectado por la heterogeneidad del material, que altera los cálculos de módulo de Young, y no es sensible a pequeños cambios en los componentes de la pasta de cemento (Philleo, 1955). Además se necesita estimar previamente el valor del coeficiente de Poisson, con la consiguiente incertidumbre (J. S. Popovics, 1997), y no se ha mostrado consistente al determinar la resistencia o detectar fallos según lo expuesto en trabajos sobre muestras de hormigón (S. Popovics & Popovics, 1992).

Por ello se está generalizando el cálculo del módulo de deformación dinámico aplicando una vibración a la probeta mediante impacto. Para ello existen varios procedimientos normalizados según que el material a ensayar sea hormigón (ASTM-C215, 2008), piedra (UNE-EN_14146, 2004) o productos refractarios (UNE-EN_ISO_12680-1, 2007). Diferentes autores han adaptado estos procedimientos al cálculo de las constantes elásticas del mortero con buenos resultados (Deniz & Erdoğan, 2015; Haach et al., 2013; Kolluru, Popovics, & Shah, 2000; Malaikah, Al-Saif, & Al-Zaid, 2004; Rosell & Cantalapiedra, 2011), utilizando tanto probetas prismáticas normalizadas 40 x 40 x 160 mm, como cilíndricas, con sus respectivas correcciones dado que los valores de E_d obtenidos para las primeras son significativamente mayores que los calculados para las segundas (Jonh S. Popovics et al., 2008).

Este procedimiento consiste en someter a una probeta a una vibración elástica y determinar la frecuencia de resonancia de la misma, que es la que se corresponde con la amplitud máxima de vibración.

1.4.3.1. Vibración.

La vibración es un fenómeno dinámico observado como un movimiento de ida y vuelta alrededor de una posición de equilibrio y está causada por la transferencia o almacenamiento de energía dentro de las estructuras, como resultado de la acción de una o más fuerzas.

El recorrido que consiste en ir desde una posición extrema a la otra y volver a la primera, pasando dos veces por la posición central, se denomina ciclo. El número de ciclos por segundo, o hercios (Hz), se conoce como frecuencia de la vibración.

Cualquier objeto oscilante tiene una 'frecuencia natural', que es la frecuencia con la que tiende a vibrar luego de una perturbación, independientemente de cual sea el valor de ésta.

La frecuencia de resonancia depende de las propiedades elásticas del material, pero también varía con la forma de la probeta (Jonh S. Popovics et al., 2008) y el grado de humedad, así como con el modo de vibración aplicado, bien sea transversal, longitudinal o de torsión.

En este sentido, al tratarse de un ensayo modal, para identificar y obtener las frecuencias para los distintos modos de vibración deberemos localizar los nodos o puntos de amplitud cero y los antinodos, vientres o puntos de amplitud de vibración máxima. Su posición en los modos longitudinal y de torsión es la misma y se localiza en el centro, sin embargo, en la menor frecuencia de resonancia o frecuencia fundamental, la posición de los nodos en el modo de vibración flexional depende ligeramente de la relación entre el radio de giro de la sección y la longitud de la probeta, pero se puede aproximar a 0,23 veces la longitud de la probeta medida desde cada uno de sus extremos. Para obtener los mejores resultados la muestra deberá apoyarse sobre gomaespuma para que vibre libremente, pero si el soporte es rígido deberá hacerlo sobre los nodos (Picket, 1945).

1.4.3.2. Evolución.

No hay una única variable que por sí sola determine la evolución de las propiedades elásticas del mortero y, además, muchas de ellas influyen de forma similar en el hormigón lo que, unido a la ausencia de datos experimentales, obliga a recurrir con frecuencia a la mayor cantidad de trabajos realizados sobre éste último para utilizarlos en el estudio de morteros (Deniz & Erdoğan, 2015).

De nuevo un aumento en la relación a/c conlleva disminución sobre el valor del módulo de elasticidad (Malhotra & Sivasundaram, 2004), aunque esta reducción no parece tan significativa como en el caso de la resistencia y sí parece estar más influenciada por las propiedades del árido (Gonçalves, Tavares, Toledo Filho, Fairbairn, & Cunha, 2007).

Esta influencia del árido en las propiedades elásticas del mortero es muy variable. Hay que conocer primeramente su propia resistencia y módulo de deformación que, a su vez, variará con el tipo de árido de que se trate, natural o de machaqueo, pero sobre todo influirá su proporción en la mezcla, que alcanza valores óptimos para un volumen de árido de 40% (N. Swamy & Rigby, 1971).

Lo cierto es que la presencia de áridos dota de una estructura de poros más abierta a los morteros, en comparación con la pasta de cemento, de manera que el volumen de las redes de poros capilares aumentará al aumentar la relación árido/cemento (Winslow, Cohen, Bentz, Snyder, & Garboczi, 1994).

Ya se ha hablado de la influencia de la porosidad en las resistencias del mortero y un comportamiento similar se ha observado en los módulos de deformación, tanto estáticos como dinámicos, reduciéndose ambos debido al aumento de esta provocado por el secado de las muestras (Yaman, Hearn, & Aktan, 2002). La humedad interior afecta a la rigidez del material provocando un efecto de refuerzo inducido que parece estar relacionado con la distribución y el tamaño de los poros capilares e, indirectamente, con la presencia de áridos que dota al mortero de una estructura de poros más abierta que aumenta con su tamaño y dosificación (Eiras, Popovics, Borrachero, Monzó, & Payá, 2015).

Mediante la aplicación de modelos empíricos se han podido obtener curvas del módulo de Young en función de la porosidad para distintas relaciones de agua/cemento y así observar como al aumentar la porosidad en el material disminuye el módulo de elasticidad.

El módulo de deformación también variará con aditivos como los plastificantes, que hacen más poroso el mortero, e influirá en él el curado, con disminuciones en su valor de entre el 5 y el 10% a medida que va secando la probeta (N. Swamy & Rigby, 1971).

De forma concluyente se puede afirmar que el módulo de deformación dinámico disminuye consistente y significativamente con el secado, y el alcance de esta disminución aparentemente depende del volumen de poros, pero también contribuye a ella la microfisuración asociada a la pérdida de agua. Es difícil cuantificar la contribución de ambas, retracción o pérdida de humedad, aunque se ha podido argumentar a partir de los datos estudiados que esta última domina los cambios en el valor de E_d a menos que el grado de microfisuración sea significativamente grande, como puede ocurrir con valores bajos de la relación agua/cemento (Eiras et al., 2015).

1.4.3.3. Predicción del módulo dinámico a partir de la resistencia.

Habitualmente es posible observar una relación directa entre las características resistentes y las propiedades elásticas aunque resulta difícil establecer una ley constitutiva, dada la heterogeneidad y no linealidad del material, de manera que todas las expresiones encontradas son válidas para un determinado rango de resistencias o propiedades de la mezcla.

Así tenemos diferentes ecuaciones en función del contenido de humedad (N. Swamy & Rigby, 1971),

$$E_d = 47.000 \sqrt{u} [psi] \quad \text{o} \quad E_d = 42.000 \sqrt{u} [psi]$$

para un mortero húmedo o seco respectivamente, o expresadas en forma porcentual (Eiras et al., 2015),

$$\%RE = \left(1 - \frac{E_{d(s=0)}}{E_{d(s=1)}}\right) 100$$

También hay variaciones con la dosificación utilizada (Haach et al., 2013),

$$E_{dynamic} = 4,05 (f_m)^{2/3} \quad \text{o} \quad E_{dynamic} = 3,76 (f_m)^{2/3}$$

En general la mayoría de autores proponen una relación exponencial entre la resistencia a compresión y el módulo de deformación dinámico, al igual que sucediera para el estático, así (Maia et al., 2011)

$$y = 4,4986 10^{0,2178x}$$

o a la inversa, establecen una regresión potencial sobre una curva de valores para estimar la resistencia a la compresión a partir del módulo de Young dinámico (Valentini et al., 2014),

$$\sigma [MPa] = 3,79 \times 10^{-3} E [GPa]^{2,60}$$

resultando una ecuación fuertemente experimental determinada a partir de una composición de mortero concreta, a diferentes edades y con distintas relaciones agua/cemento.

1.4.3.4. Relaciones entre módulos de deformación.

Se han propuesto varias correlaciones entre el módulo estático y dinámico, fundamentalmente para hormigón, que abarcan desde soluciones sencillas con relaciones lineales a partir de expresiones experimentales (Lydon & Balendran, 1986),

$$E = 0,83 E_d$$

(Haach et al., 2013),

$$E_d = 1,391 E$$

(Lu, Sun, Feng, & Tian, 2013),

$$E_d = 1,15 E_s$$

(R. N. Swamy & Bandyopadhyay, 1975),

$$E = 1,25E_d - 19 [GPa]$$

a otras más complejas que la hacen depender de la densidad (Jonh S. Popovics et al., 2008),

$$E = kE_d^{1,4} \rho^{-1}$$

o de la amortiguación de la oscilación (Nagy, 1997),

$$E_{stat} = \frac{E_{dyn}}{1 - \eta^2}$$

Pero en cualquier caso esta relación entre módulos puede variar significativamente en función de aspectos como la dosificación utilizada, el método de curado, las condiciones de ensayo, el tipo de cemento o el árido utilizado entre otros (Neville, 2011).

Actualmente se acepta que E_s (módulo estático) es sólo un poco más pequeño que E_d (módulo dinámico), entre un 5 y un 8%, como sucede en los resultados obtenidos para diferentes probetas de hormigón con árido calizo, sin embargo con otros áridos se han encontrado valores con diferencias significativas, que llegan al 45% (Lu et al., 2013).

También se ha podido comprobar que la diferencia entre ambos módulos está influenciada por el procedimiento de ensayo utilizado para la obtención de los datos (Jonh S. Popovics et al., 2008) y que esta diferencia tiende a disminuir con el tiempo de curado (N. Swamy & Rigby, 1971).

En particular, los valores del módulo de deformación dinámico obtenidos a partir de la velocidad de propagación de ultrasonidos son superiores a los medidos mediante vibración por impacto (Rosell & Cantalapiedra, 2011),

$$MOE_{impact} = 1,17 E - 1800 [MPa]$$

$$MOE_{us} = 1,28 E - 1750 [MPa]$$

y, dentro de estos, hay diferencias entre las frecuencias medidas en el modo de vibración longitudinal y el transversal (Jonh S. Popovics et al., 2008; N. Swamy & Rigby, 1971), sin que además haya coincidencia sobre cual es mayor de los dos.

Esto indica que son necesarios más estudios en este campo y que cuando se realiza un análisis estructural dinámico estimando E_d a partir de E_s , o más simplificadaamente igualando ambos valores, puede incurrirse en resultados erróneos, siendo recomendable que el módulo de deformación dinámico se determine directamente en vez de calcularlo a partir del módulo de deformación estático.

1.5. Módulo de Poisson, ν .

El coeficiente de Poisson es un parámetro característico de cada material que indica la relación entre el alargamiento longitudinal que sufre en la dirección de la fuerza aplicada y el que experimenta en la dirección perpendicular.

Un sólido elástico lineal e isótropo queda caracterizado con tan solo dos constantes elásticas. Una vez que hemos obtenido el módulo de Young lo más común es definir el coeficiente de Poisson (Narayan Swamy, 1971).

No se han constatado variaciones significativas en el valor de esta constante elástica para diferentes dosificaciones de cemento Portland y distintos tipos de árido (Herve et al., 2010). Tampoco hay variaciones importantes con la edad del mortero, los valores obtenidos en ensayos a 28 días son ligeramente inferiores que a los 21 días y estas diferencias podrían ser atribuidas a la mayor rigidez de las probetas por valores más altos en el módulo de elasticidad (Toma et al., 2013).

Además, respecto al cálculo del módulo de deformación a partir de la frecuencia de resonancia en el modo de flexión tal y como propone la norma (ASTM-C215, 2008), cambios en su estimación entre valores de $1/6$ y $1/4$ incrementan E_d menos de un 2%, indicando que el método de resonancia está tan solo ligeramente influenciado por esta constante elástica (Philleo, 1955).

Otros trabajos han estudiado la evolución del módulo de Poisson dinámico, ν_d , con el contenido de humedad de la probeta, encontrando que se reduce al disminuir este. Además esta variación es mucho más rápida en los primeros siete días del amasado y más amortiguada después (Deniz & Erdoğan, 2015).

En este mismo estudio, el valor más bajo obtenido a 56 días de edad para morteros con elevada resistencia fue de $\nu=0,20$, mientras que el más alto, a la misma edad y para morteros de baja resistencia, fue de $\nu=0,22$.

1.6. Efecto tamaño.

Es importante determinar si el tamaño de la muestra influye de forma significativa en las propiedades del material ya que hay limitaciones en la extracción de testigos de morteros puestos en obra. En el caso de morteros de revestimiento o formando parte de juntas de mampostería o fábricas de ladrillo, el grosor máximo de un espécimen para prueba es de aproximadamente 15 o 20 mm, y no es posible extraer una muestra con un formato estándar clásico de dimensiones 40 x 40 x 160 mm (Drdácký, 2011).

Se ha comprobado que en general la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad de materiales que presentan una rotura casi frágil, como el mortero, se ven afectados por el tamaño de la muestra de ensayo, más concretamente, la resistencia medida sobre una probeta estándar en laboratorio varía respecto del mismo material analizado en una estructura real (Bažant & Planas, 1998). De forma sencilla se obtiene que su valor aumenta cuando se reduce el tamaño.

Para poder tener una referencia comparable con un formato normalizado, la resistencia a compresión de muestras de mortero de diferentes espesores se puede corregir utilizando expresiones que utilizan la esbeltez de la probeta, pero no hay una formulación comparable para sus propiedades elásticas.

En el caso del módulo de elasticidad estático, se ha comprobado que este decrece drásticamente al variar el área de la sección de un prisma desde un tamaño de 25 x 25 mm a otro de 50 x 50 mm. Pero no solo las dimensiones sino también la forma influyen en su valor, en particular hay una importante diferencia entre la resistencia última obtenida para una probeta cúbica y la medida para otra cilíndrica, lo cual ha obligado a establecer correlaciones entre ambas que permitan comparar valores de resistencia (Majeed, 2011).

De igual manera se sabe que el módulo de deformación dinámico medido en piezas prismáticas es significativamente más elevado que el obtenido para cilindros del mismo material (Jonh S. Popovics et al., 2008).

1.7. Análisis numérico.

Para analizar la compleja realidad que nos rodea es útil partir de conceptos más simples que la representen. En muchos casos se obtiene un modelo adecuado utilizando un número finito de componentes -modelo discreto- pero en otros la subdivisión continúa indefinidamente conduciéndonos a ecuaciones diferenciales o expresiones equivalentes con un número infinito de elementos implicados -sistemas continuos- (Zienkiewicz & Taylor, 2005).

Las ecuaciones diferenciales son muy utilizadas en todas las ramas de la ingeniería para el modelado de fenómenos físicos, incluyendo los expuestos de elasticidad (Washizu, 1982). Una ecuación diferencial es una ecuación que incluye expresiones o términos que involucran a una función matemática incógnita y sus derivadas. Dependiendo del número de variables independientes respecto de las que se deriva, las ecuaciones diferenciales se dividen en *ordinarias*, aquellas que contienen derivadas respecto a una sola variable independiente, y en *derivadas parciales* (EDP), cuando contienen derivadas respecto a dos o más variables.

Para calcular soluciones aproximadas de ecuación diferencial se puede utilizar el análisis numérico. En el caso de ecuaciones diferenciales ordinarias el método más utilizado es el de Euler; para las ecuaciones en derivadas parciales se requiere un método de discretización que se adapte a la geometría, esto puede resolverse mediante el método de los elementos finitos (MEF) (Strang & Fix, 1973). Además el método es fácilmente adaptable a problemas de vibración.

También se han desarrollado programas para el estudio de la microestructura 3D de materiales cementosos y su relación con las propiedades físicas, basados en modelos informáticos que generan materiales virtuales en los que se simulan los mecanismos de desarrollo microestructural. Un ejemplo es el Virtual Cement and Concrete Testing Laboratory (VCCTL) desarrollado por el National Institute of Standards and Technology (NIST) para predecir las propiedades elásticas y la resistencia a compresión de materiales conglomerados con cemento (Valentini et al., 2014).

1.7.1. Método de los elementos finitos.

El modo en que una vibración afecta a una probeta de mortero se puede simular suponiendo un material elástico lineal e isótropo que vibra libremente sin condiciones de contorno (Cheng & Sansalone, 1995). Esta suposición es válida porque las tensiones producidas en la probeta por la vibración son muy pequeñas.

La forma de operar es generar un conjunto de elementos finitos o discretización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados «nodos», el conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama «malla». Es importante realizar un estudio de la sensibilidad del modelo para el tamaño de malla antes de llevar a cabo la simulación.

El impacto del martillo sobre la probeta se simuló mediante la aplicación de una carga de presión sobre un pequeño número de elementos. En el análisis, se consideraron las probetas de mortero sin soportes para evitar la excitación de un único modo de vibración causada por las restricciones rígidas.

El MEF convierte un problema definido en términos de ecuaciones diferenciales en un problema en forma matricial que proporciona el resultado correcto para un número finito de puntos llamados nodos e interpola posteriormente la solución al resto del dominio, resultando finalmente sólo una solución aproximada.

1.7.1.1. Fases del método.

El primer paso para la solución es determinar las propiedades de cada elemento a partir de la geometría del problema, de los datos de carga y de la naturaleza del material. Se determina la matriz de rigidez para cada elemento, así como las correspondientes cargas en los nudos. Cada elemento tiene su propio número de identificación y sus conexiones nodales específicas.

Se define así un conjunto de parámetros discretos de manera que describan el comportamiento de cada elemento y también el comportamiento de sistema conjunto. Los llamaremos *parámetros del sistema*. Para cada elemento se expresa un conjunto de cantidades en función de los parámetros del sistema que pueden constituir una relación no lineal o, en muchos casos, lineal.

El segundo paso es el ensamblaje de las ecuaciones finales. Las ecuaciones del sistema se obtienen mediante simple adición.

El tercer paso es introducir las condiciones de contorno en la matriz final ya ensamblada.

El paso final será la resolución del sistema de ecuaciones resultantes. Para ello se pueden seguir diversos métodos.

1.7.1.2. Cálculo por ordenador.

Las tareas necesarias para llevar a cabo un cálculo mediante MEF se dividen en:

- **Preproceso**, que consiste en la definición de geometría, generación de la malla, las condiciones de contorno y asignación de propiedades a los materiales.
- **Cálculo**, en un problema simple se generan un sistema lineal de N ecuaciones y N incógnitas, cuando el problema a tratar es más complejo a veces el cálculo consiste en una sucesión finita de sistemas de N ecuaciones y N incógnitas que deben resolverse uno a continuación de otro, y cuya entrada depende del resultado del paso anterior.
- **Postproceso**, el cálculo proporciona valores de cierto conjunto de funciones en los nodos de la malla que define la discretización, en el postproceso se calculan magnitudes derivadas de los valores obtenidos para los nodos, y en ocasiones se aplican operaciones de suavizado e interpolación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI_363R-92. (1992). State-of-the-art report on high-strength concrete. *American Concrete Institute Committee 363*.
- ASTM-C215. (2008). Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens. *Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials*.
- ASTM-C469. (2010). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. *Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials*.
- Atiř, C. D., Kiliç, A., & Sevim, U. K. (2004). Strength and shrinkage properties of mortar containing a nonstandard high-calcium fly ash. *Cement and Concrete Research, 34*(1), 99-102. doi: 10.1016/S0008-8846(03)00247-3
- Bařant, Z. P., & Oh, B. H. (1983). Crack band theory for fracture of concrete. *Matériaux et Constructions, 16*(3), 155-177. doi: 10.1007/BF02486267
- Bařant, Z. P., & Planas, J. (1998). *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials*.
- Bentur, A., & Mitchell, D. (2008). Material performance lessons. *Cement and Concrete Research, 38*(2), 259-272. doi: 10.1016/j.cemconres.2007.09.009
- Bisschop, J., & Van Mier, J. G. M. (2002). Effect of aggregates on drying shrinkage microcracking in cement-based composites. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions, 35*(252 SPEC.), 453-461.
- Boffill, Y., Blanco, H., Lombillo, I., Villegas, L., & Thomas, C. (2014). Caracterización física y mecánica de los morteros de cal utilizados en la rehabilitación de edificios históricos por medio de ensayos no destructivos. *Congreso Latinoamericano REHABEND 2014*.
- Boumiz, A., Vernet, C., & Cohen Tenoudji, F. (1996). Mechanical properties of cement pastes and mortars at early ages. *Advanced Cement Based Materials, 3*(3-4), 94-106. doi: 10.1016/1065-7355(95)00072-0
- BS_5628-1. (1992). Code of Practice for Use of Masonry: Part 1: Structural Use of Unreinforced Masonry. *British Standard*.
- BS_8110-85. (1985). Structural use of concrete. Part 2: Code of practice for special circumstances. *British Standard*.
- Capener, J. C. M. (2006). *Effect of admixtures on the fresh and hardened properties of modern rendering systems*. Paper presented at the Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting - Proceedings of the International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR 2005.
- Capener, J. C. M. (2009). *Properties of modern rendering systems based on mineral binders modified by organic admixtures*. Paper presented at the Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II - Proceedings of the 2nd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR.
- Casali, Ricardo A., Caravaca, Maria A., Acevedo, Carolina, Miño, Julio C., Bizzotto, Marcela, & Torra, Roberto. (2007). Predicción de la resistencia a la compresión y determinación de propiedades estructurales a partir de ensayos no destructivos. *IV Conferencia Panamericana de END*.

- Chen, X., Wu, S., & Zhou, J. (2013). Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 40, 869-874. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.072
- Cheng, C. c., & Sansalone, M. (1995). Determining the minimum crack width that can be detected using the impact-echo method Part 1: Experimental study. *Materials and Structures*, 28(2), 74-82. doi: 10.1007/BF02473174
- Chindapasirt, P., Chareerat, T., & Sirivivatnanon, V. (2007). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 29(3), 224-229. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.11.002>
- Chindapasirt, P., Homwuttiwong, S., & Sirivivatnanon, V. (2004). Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. *Cement and Concrete Research*, 34(7), 1087-1092. doi: 10.1016/j.cemconres.2003.11.021
- Deniz, S., & Erdoğan, S. T. (2015). Prediction of elastic moduli development of cement mortars using early age measurements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(1). doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001025
- Drdácký, M. (2011). Non-standard testing of mechanical characteristics of historic mortars. *International Journal of Architectural Heritage*, 5(4-5), 383-394. doi: 10.1080/15583051003717788
- Eiras, J. N., Popovics, J. S., Borrachero, M. V., Monzó, J., & Payá, J. (2015). The effects of moisture and micro-structural modifications in drying mortars on vibration-based NDT methods. *Construction and Building Materials*, 94, 565-571. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.078
- Elsen, J. (2006). Microscopy of historic mortars-a review. *Cement and Concrete Research*, 36(8), 1416-1424. doi: 10.1016/j.cemconres.2005.12.006
- Esteves, L. P., Cachim, P., & Ferreira, V. M. (2007). *Mechanical properties of cement mortars with superabsorbent polymers*. Paper presented at the Advances in Construction Materials 2007.
- Gonçalves, J. P., Tavares, L. M., Toledo Filho, R. D., Fairbairn, E. M. R., & Cunha, E. R. (2007). Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 37(6), 924-932. doi: 10.1016/j.cemconres.2007.03.009
- Haach, V. G., Carrazedo, R., Oliveira, L. M. F., & Corrêa, M. R. S. (2013). Application of acoustic tests to mechanical characterization of masonry mortars. *NDT and E International*, 59, 18-24. doi: 10.1016/j.ndteint.2013.04.013
- Haach, V. G., Vasconcelos, G., & Loureno, P. B. (2011). Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars. *Construction and Building Materials*, 25(6), 2980-2987. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.011
- Hernández-Olivares, F., & Mayor-Lobo, P. (2011). Experimental assessment of commercial one-coat renders for buildings facades. *Construction and Building Materials*, 25(1), 156-162. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.044
- Herve, E., Care, S., & Seguin, J. P. (2010). Influence of the porosity gradient in cement paste matrix on the mechanical behavior of mortar. *Cement and Concrete Research*, 40(7), 1060-1071. doi: 10.1016/j.cemconres.2010.02.010
- Hossain, A. B., & Weiss, J. (2006). The role of specimen geometry and boundary conditions on stress development and cracking in the restrained ring test. *Cement and Concrete Research*, 36(1), 189-199. doi: 10.1016/j.cemconres.2004.06.043

- Juenger, M. C. G., Winnefeld, F., Provis, J. L., & Ideker, J. H. (2011). Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1232-1243. doi: 10.1016/j.cemconres.2010.11.012
- Kolluru, S. V., Popovics, J. S., & Shah, S. P. (2000). Determining elastic properties of concrete using vibrational resonance frequencies of standard test cylinders. *Cement, Concrete and Aggregates*, 22(2), 81-89.
- Kovler, K., & Roussel, N. (2011). Properties of fresh and hardened concrete. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 775-792. doi: 10.1016/j.cemconres.2011.03.009
- Lu, X., Sun, Q., Feng, W., & Tian, J. (2013). Evaluation of dynamic modulus of elasticity of concrete using impact-echo method. *Construction and Building Materials*, 47, 231-239. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.04.043
- Lydon, F. D., & Balendran, R. V. (1986). Some observations on elastic properties of plain concrete. *Cement and Concrete Research*, 16(3), 314-324. doi: 10.1016/0008-8846(86)90106-7
- Maia, L., Azenha, M., Faria, R., & Figueiras, J. (2011). Influence of the cementitious paste composition on the E-modulus and heat of hydration evolutions. *Cement and Concrete Research*, 41(8), 799-807. doi: 10.1016/j.cemconres.2011.03.008
- Majeed, S. A. (2011). Effect of specimen size on compressive, modulus of rupture and splitting strength of cement mortar. *Journal of Applied Sciences*, 11(3), 584-588. doi: 10.3923/jas.2011.584.588
- Malaikah, Ala, Al-Saif, Khalid, & Al-Zaid, Rajeh. (2004). Prediction of the dynamic modulus of elasticity of concrete under different loading conditions. *International Conference On Concrete Engineering and Technology*.
- Malhotra, V. M., & Sivasundaram, V. (2004). Resonant frequency methods. *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, 71-721.
- Meyer, C. (2009). The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*, 31(8), 601-605. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010
- Nagy, A. (1997). Determination of E-modulus of young concrete with nondestructive method. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 9(1), 15-20.
- Naik, T. R., Singh, S., & Ramme, B. (1998). Mechanical properties and durability of concrete made with blended fly ash. *ACI Materials Journal*, 95(4), 454-462.
- Narayan Swamy, R. (1971). Dynamic Poisson's ratio of portland cement paste, mortar and concrete. *Cement and Concrete Research*, 1(5), 559-583. doi: 10.1016/0008-8846(71)90060-3
- Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete (4th Edition)*. (5th ed.). London: Pearson Education Limited.
- Ohama, Y. (1998). Polymer-based admixtures. *Cement and Concrete Composites*, 20(2-3), 189-212.
- Paiva, H., Esteves, L. P., Cachim, P. B., & Ferreira, V. M. (2009). Rheology and hardened properties of single-coat render mortars with different types of water retaining agents. *Construction and Building Materials*, 23(2), 1141-1146. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.06.001
- Philleo, R. E. (1955). Comparison of Results of Three Methods for Determining Young's Modulus of Elasticity of Concrete. *Journal Proceedings*, 51(1), 461-470. doi: 10.14359/11690

- Picket, G. (1945). Equations for Computing Elastic Constants from Flexural and Torsional Resonant Frequencies of Vibration of Prisms and Cylinders. *Proceedings of the American Society for Testing and Materials. Portland Cement Association, Vol. 45*, 846-865.
- Popovics, J. S. (1997). Effects of Poisson's ratio on impact-echo test analysis. *Journal of Engineering Mechanics*, 123(8), 843-850.
- Popovics, Jonh S., Zemajtis, J., & Shkolnik, I. (2008). A study of static and dynamic modulus of elasticity of concrete.
- Popovics, S., & Popovics, J. S. (1992). *Critique of the ultrasonic pulse velocity method for testing concrete*. Paper presented at the Nondestructive Testing of Concrete Elements and Structures.
- Rao, G. A. (2001a). Development of strength with age of mortars containing silica fume. *Cement and Concrete Research*, 31(8), 1141-1146. doi: 10.1016/S0008-8846(01)00540-3
- Rao, G. A. (2001b). Generalization of Abrams' law for cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 31(3), 495-502. doi: 10.1016/S0008-8846(00)00473-7
- Rosell, J. R., & Cantalapiedra, I. R. (2011). Simple method of dynamic Young's modulus determination in lime and cement mortars. *Materiales de Construccion*, 61(301), 39-48. doi: 10.3989/mc.2010.53509
- Scrivener, K. L., & Kirkpatrick, R. J. (2008). Innovation in use and research on cementitious material. *Cement and Concrete Research*, 38(2), 128-136. doi: 10.1016/j.cemconres.2007.09.025
- Scherer, George W. (1990). Theory of drying. *Journal of the American Ceramic Society*, 73(1), 3-14.
- Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., & Bolio, H. (2011). Sustainable cement production-present and future. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 642-650. doi: 10.1016/j.cemconres.2011.03.019
- Schulze, Joachim. (1999). Influence of water-cement ratio and cement content on the properties of polymer-modified mortars. *Cement and Concrete Research*, 29(6), 909-915. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00060-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00060-5)
- Shkolnik, I. E. (2005). Effect of nonlinear response of concrete on its elastic modulus and strength. *Cement and Concrete Composites*, 27(7-8), 747-757. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.12.006>
- Singh, S. B., Munjal, Pankaj, & Thammishetti, Nikesh. (2015). Role of water/cement ratio on strength development of cement mortar. *Journal of Building Engineering*, 4, 94-100. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2015.09.003>
- Strang, G., & Fix, G. J. (1973). *An Analysis of the Finite Element Method*.
- Swamy, N., & Rigby, G. (1971). Dynamic properties of hardened paste, mortar and concrete. *Matériaux et Constructions*, 4(1), 13-40. doi: 10.1007/BF02473927
- Swamy, R. N., & Bandyopadhyay, A. K. (1975). ELASTIC PROPERTIES OF STRUCTURAL LIGHTWEIGHT CONCRETE. *Proc Inst Civ Eng (Lond)*, 59(pt 2), 381-394.
- Toma, I. O., Covatariu, D., Toma, A. M., Taranu, G., & Budescu, M. (2013). Strength and elastic properties of mortars with various percentages of environmentally sustainable mineral binder. *Construction and Building Materials*, 43, 348-361. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.061

- UNE-EN_197-1. (2011). Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes. *AENOR*.
- UNE-EN_413-1. (2011). Cementos de albañilería. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad. *AENOR*.
- UNE-EN_413-2. (2006). Cementos de albañilería. Parte 2: Métodos de ensayo. *AENOR*.
- UNE-EN_459-1. (2011). Cales para albañilería. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad. *AENOR*.
- UNE-EN_934-1. (2009). Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 1: Requisitos comunes. *AENOR*.
- UNE-EN_998-1. (2010). Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: morteros para revoco y enlucido. *AENOR*.
- UNE-EN_1015-3. (2003). Método de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas). *AENOR*.
- UNE-EN_1015-6. (1999). Método de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco. *AENOR*.
- UNE-EN_1015-9. (2000). Método de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 9: Determinación del periodo de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco. *AENOR*.
- UNE-EN_1015-10. (2000). Método de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido. *AENOR*.
- UNE-EN_1015-11. (2000). Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido. *AENOR*.
- UNE-EN_1015-12. (2000). Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 12: Determinación de la resistencia a la adhesión de los morteros para revocos y enlucidos endurecidos aplicados sobre soportes. *AENOR*.
- UNE-EN_1352. (1997). Determinación del módulo de elasticidad estática bajo compresión del hormigón curado en autoclave o de áridos ligeros con estructura abierta. *AENOR*.
- UNE-EN_13139. (2003). Áridos para morteros. *AENOR*.
- UNE-EN_14146. (2004). Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del módulo de elasticidad dinámico (con la medida de la frecuencia de resonancia fundamental). *AENOR*.
- UNE-EN_ISO_12680-1. (2007). Métodos de ensayo para productos refractarios. Parte 1: Determinación del módulo de Young dinámico (MOE) por excitación de la vibración por impulso. *AENOR*.
- UNE_41302-IN. (2013). Instrucciones para la aplicación de moretos de revestimiento exteriores e interiores. *AENOR*.
- UNE_80305. (2012). Cementos blancos. *AENOR*.
- Válek, J., & Veiga, R. (2005). *Characterisation of mechanical properties of historic mortars - Testing of irregular samples*. Paper presented at the WIT Transactions on the Built Environment.

- Valentini, L., Parisatto, M., Russo, V., Ferrari, G., Bullard, J. W., Angel, R. J., . . . Artioli, G. (2014). Simulation of the hydration kinetics and elastic moduli of cement mortars by microstructural modelling. *Cement and Concrete Composites*, 52, 54-63. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.05.005
- Wang, J. C. (1984). Young's modulus of porous materials - Part 1 Theoretical derivation of modulus-porosity correlation. *Journal of Materials Science*, 19(3), 801-808. doi: 10.1007/BF00540451
- Washizu, K. (1982). *Variational Methods in Elasticity and Plasticity*.
- Winslow, D. N., Cohen, M. D., Bentz, D. P., Snyder, K. A., & Garboczi, E. J. (1994). Percolation and pore structure in mortars and concrete. *Cement and Concrete Research*, 24(1), 25-37. doi: 10.1016/0008-8846(94)90079-5
- Yaman, I. O., Hearn, N., & Aktan, H. M. (2002). Active and non-active porosity in concrete. Part I: Experimental evidence. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 34(246), 102-109.
- Zhang, W., Zakaria, M., & Hama, Y. (2013). Influence of aggregate materials characteristics on the drying shrinkage properties of mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, 49, 500-510. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.069
- Zhou, J., Chen, X., Wu, L., & Kan, X. (2011). Influence of free water content on the compressive mechanical behaviour of cement mortar under high strain rate. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 36(3), 357-369. doi: 10.1007/s12046-011-0024-6
- Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2005). *The Finite Element Method Set*.

Caracterización del mortero.

2.1. INTRODUCCIÓN.	51
2.2. MORTERO EN POLVO.	53
2.3. MORTERO EN PASTA.	56
2.3.1. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS.	56
2.3.2. CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE AGUA POR SUCCIÓN.	57
2.3.3. CONSISTENCIA.....	61
2.3.4. DENSIDAD APARENTE.....	63
2.3.5. CONTENIDO EN AIRE.	66
2.4. MORTERO ENDURECIDO.	68
2.4.1. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS.	68
2.4.2. RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN.	72
2.4.3. RESISTENCIA A COMPRESIÓN.	75
2.4.4. DENSIDAD APARENTE EN SECO.....	78
2.4.5. RETRACCIÓN DE SECADO DEL MORTERO.....	83
2.4.6. SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL MÓDULO DE DEFORMACIÓN DINÁMICO.....	87
2.5. TABLA RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL MORTERO.	93

En este capítulo se describen los ensayos y procedimientos llevados a cabo para la determinación de las características de identificación del mortero, siempre dentro del marco normativo.

2.1. Introducción.

El material que se va a caracterizar es el mortero monocapa ONEXIT UNIVERSAL para revestimiento de fachadas proporcionado por la empresa ONEXIT IDATEC, S.L. y que lo elabora en su factoría situada en el Pol. Industrial Belako c/. Tejera, s/n. Ed. Sanig nave 1 y 2, 48100 MUNGUÍA (Vizcaya).

El mortero ONEXIT MONOCAPA UNIVERSAL constituye un revestimiento continuo para acabado y protección frente a la lluvia de muros de fachada de albañilería u hormigón, constituido por un mortero modificado y coloreado que, una vez aplicado y parcialmente endurecido, admite diversos acabados (Raspado o labrado, Tirolesa o gota, Rústico, Chafado y Fratasado), según se recoge en el Documento de Idoneidad Técnica Plus (DIT_plus:543p/09, 2009).

La fabricación se realiza por procedimientos mecánicos, mezclando los componentes mayoritarios y parte de los minoritarios, previamente dosificados en una báscula automática controlada por ordenador, a los que se añade manualmente en el mezclador, a través de una tolva-pesadora de control, el resto de los componentes minoritarios.

Una vez concluida la mezcla se vierte en tolvas de producto acabado que alimentan las ensacadoras donde se envasa el material en sacos de papel de kraft de dos hojas con una lámina intermedia de polietileno. El contenido neto del saco es de 30 kg ($\pm 2\%$) (Fig. 2-1).



Fig. 2-1 Mortero monocapa Onexit Universal.

El conglomerante es cemento Portland Blanco BL I/A-L 42,5 R, según las especificaciones recogidas para los cementos comunes y blancos (UNE-EN_197-1, 2011; UNE_80305, 2012), los áridos son una mezcla de silíceos y calizos y contiene aditivos tales como retenedores de humedad, áridos ligeros, hidrófugos de masa, fibras celulósicas, aireantes, plastificantes y pigmentos inorgánicos. El producto solo requiere la adición de agua para su empleo y se suministra en varias tonalidades, según carta de colores del fabricante.

Caracterización del mortero.

Está clasificado como OC (One coat mortar) mortero para revoco monocapa, CS III W2 según norma (UNE-EN_998-1, 2010) al presentar siempre una resistencia a compresión superior a 5 MPa y una capilaridad inferior a $0,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$. Este producto en concreto no tiene propiedades aislantes.

Estas características superan las requeridas por el Código Técnico de la Edificación (CTE) para cumplir con el requisito básico de salubridad dentro de la exigencia básica de habitabilidad recogida en el apartado 1 del DB-HS dedicado a fachadas. Según dicha norma estaríamos hablando de un revestimiento continuo exterior con una resistencia muy alta a la filtración (R3).

No obstante, para identificar correctamente el mortero se van a realizar un número suficiente de ensayos del producto en polvo, en pasta y endurecido de los recogidos en el capítulo 10 del mencionado DIT nº 543 p/09 (Tabla 2–1), para proceder a la comparación de sus resultados.

Características	
Agua de amasado [%]	24
Retención de agua [%]	≥90
Consistencia [mm]	148
Densidad aparente del producto en pasta [kg/m^3]	1.733
Densidad aparente del producto endurecido [kg/m^3]	1.512
Resistencias a compresión 28 días [MPa]	7,5
Resistencias a flexotracción 28 días [MPa]	2,0
Retracción (mm/m) 28 días	0,9
Módulo de elasticidad dinámico [MPa]	6.500

Tabla 2–1 Características del mortero Onexit Monocapa Universal facilitadas por el fabricante.

2.2. Mortero en polvo.

Para conocer su aspecto microestructural y tamaño máximo de partículas iniciales resulta útil realizar un análisis de una muestra de mortero seco mediante técnicas de microscopía electrónica.

Para la observación microestructural, se ha empleado un microscopio electrónico de barrido marca Zeiss, modelo EVO15.

En la Fig. 2-2 se recoge el aspecto del premezclado seco tal y como ha sido suministrado por el fabricante.

Como puede apreciarse, sus partículas presentan tamaños inferiores a las 100 micras a excepción de algún grano macizo aislado. Al aumentar la resolución, Fig. 2-3 y Fig. 2-4, se distingue la presencia poco frecuente de una morfología alveolar de pared delgada y tamaños por debajo de las 50 micras.

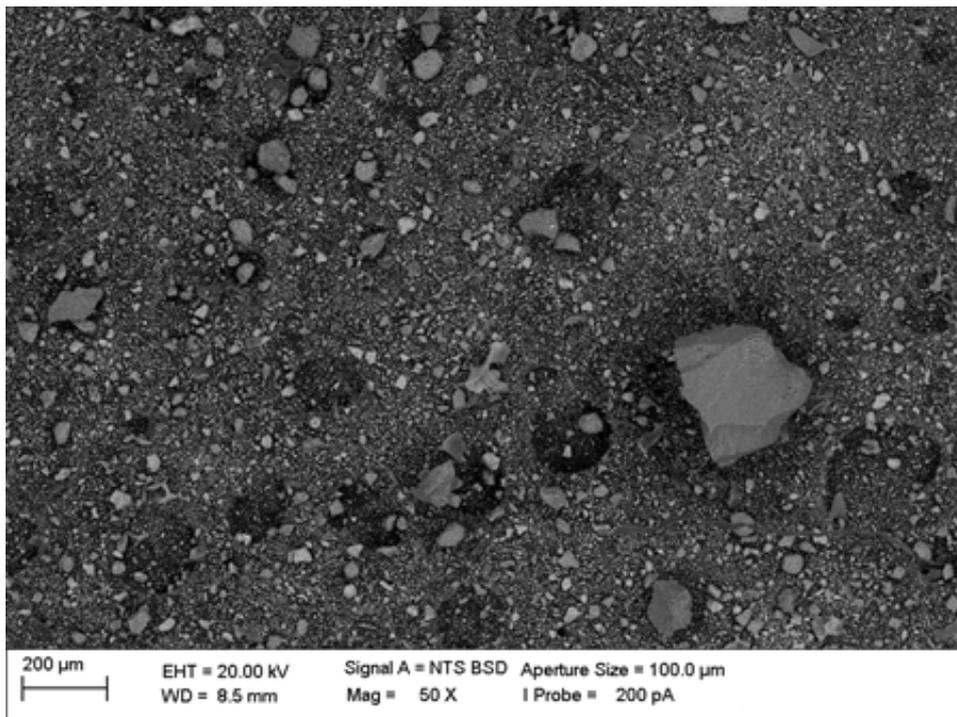


Fig. 2-2 Micrografía 01. Aspecto del premezclado seco suministrado (50x).

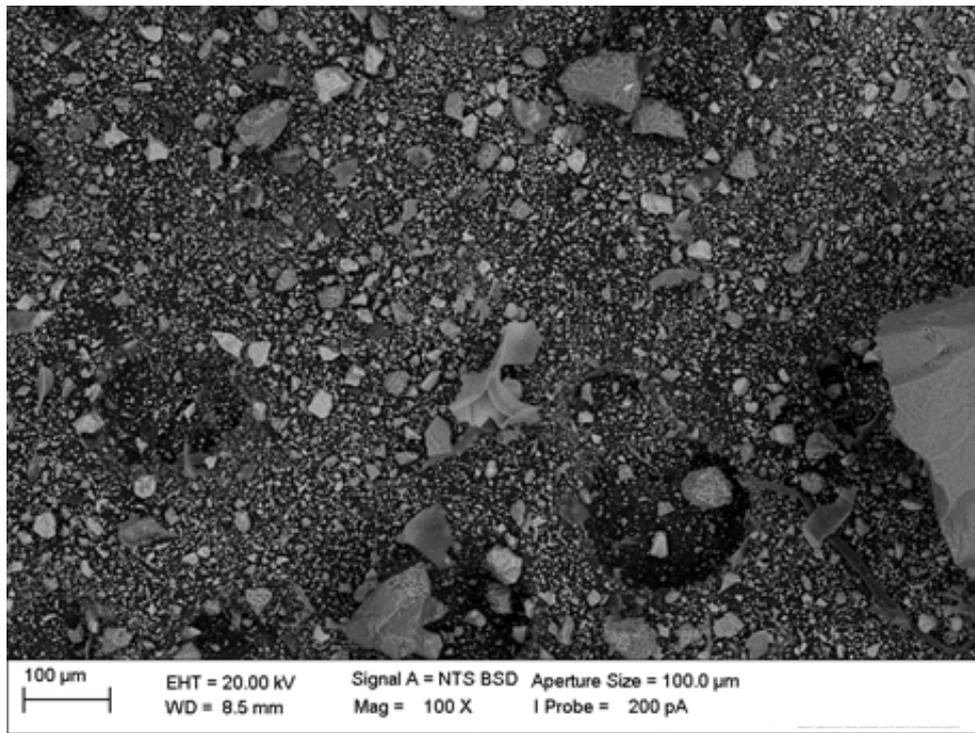


Fig. 2-3 Micrografía 02. Aspecto del premezclado seco suministrado (100x).

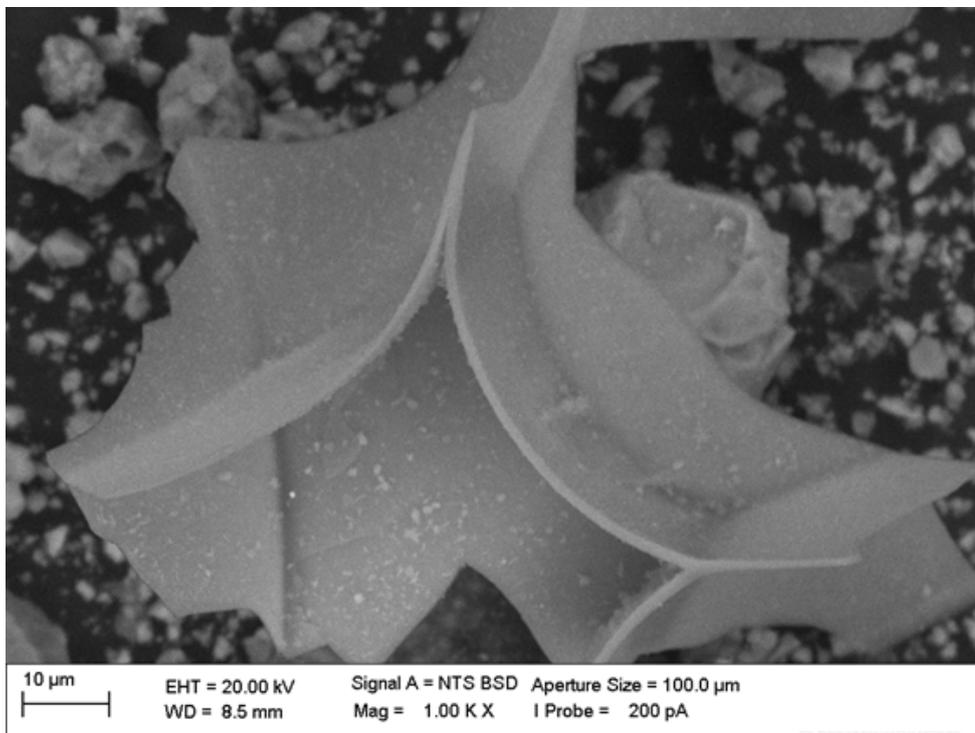


Fig. 2-4 Micrografía 03. Aspecto de la partícula alveolar (1000x).

El análisis elemental realizado sobre una de dichas partículas, representativa del conjunto, arroja la composición típica de un producto derivado del cemento, tal como se muestra en la Fig. 2-5.

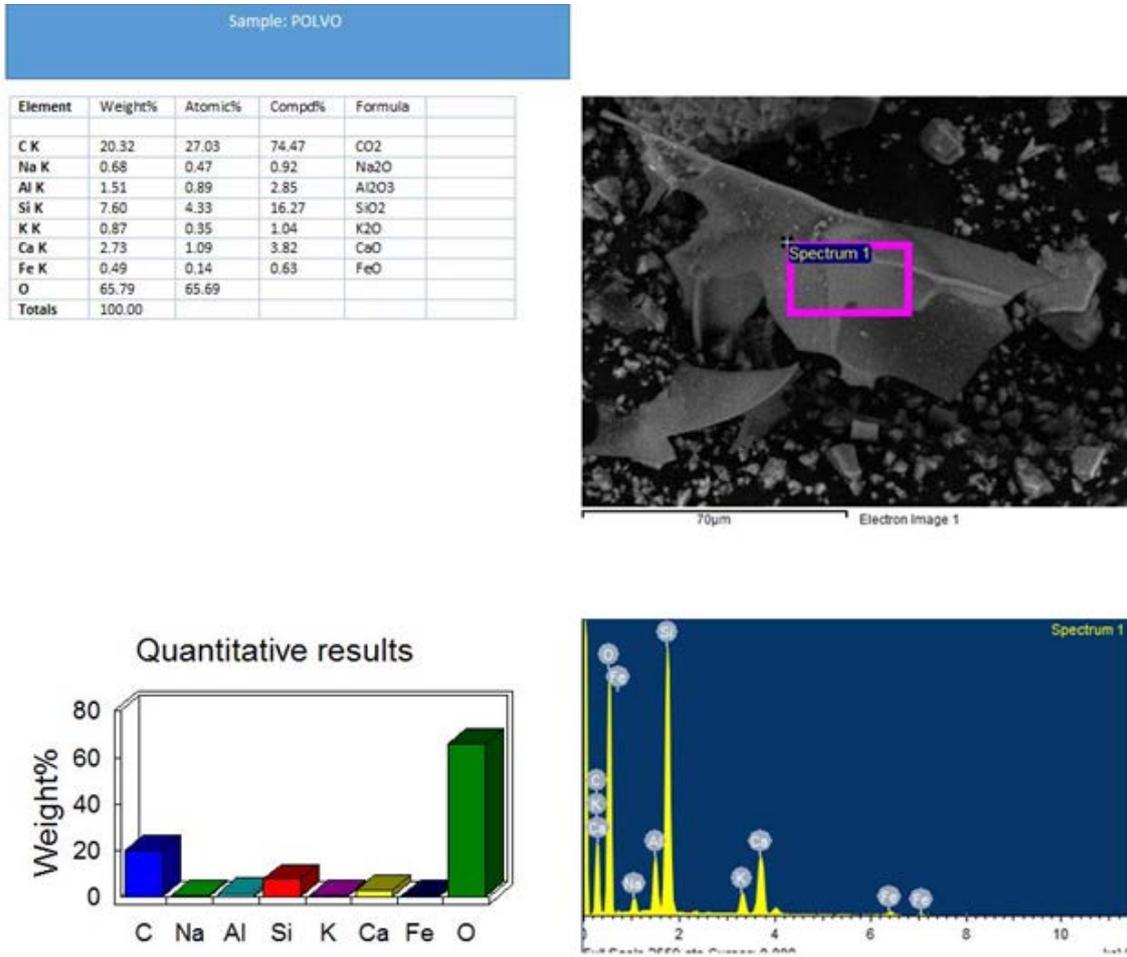


Fig. 2-5 Análisis elemental de la partícula alveolar.

2.3. Mortero en pasta.

Resulta útil conocer las características de la pasta de mortero para valorar su trabajabilidad y predecir su resistencia, especialmente la cantidad de agua y la relación agua/cemento, pues influyen en el proceso de hidratación del mortero y en la posterior evolución de sus características mecánicas.

2.3.1. Preparación de las muestras.

La preparación de las muestras necesarias para la realización de los ensayos que van a determinar las características del producto fresco consiste únicamente en realizar el amasado de la cantidad necesaria de producto con el porcentaje de agua que marca el fabricante en la ficha técnica.

Como se acaba de ver en la tabla de las características del mortero facilitada por el productor se recomienda una proporción de agua de un 24% en peso (aproximadamente 7 litros de agua por saco de 30 kg de monocapa) para su aplicación en obra porque con este porcentaje se consigue una trabajabilidad adecuada.

Por esta razón tanto las muestras necesarias para los ensayos en fresco, como las probetas para los ensayos con el mortero a los 28 días, se amasarán con dicho porcentaje de agua.

En este sentido, se debe tener en cuenta que un exceso de agua puede incrementar las retracciones y disminuir las resistencias mecánicas.

2.3.1.1. Amasado.



Fig. 2-6 Amasadora.

El sistema de amasado es un proceso determinante que influye en las propiedades del mortero endurecido y por eso es preciso establecer la misma metodología de amasado para la elaboración de todas las probetas. Para ello, durante el amasado, se han de tener en cuenta el orden de incorporación de los componentes, así como los tiempos y velocidades de agitación para elaborar la pasta.

El amasado de morteros está normalizado (UNE-EN_196-1, 2005).

Los aparatos necesarios para el amasado del mortero son los siguientes:

- Una amasadora que constará esencialmente de un recipiente de 5 litros de capacidad equipado de tal manera que pueda ser

fijado firmemente al bastidor de la amasadora durante el amasado de forma que la altura del recipiente pueda ajustarse y mantenerse con precisión (Fig. 2-6).

- Una pala, cuya forma y medidas están fijadas normativamente, accionada por un motor eléctrico de velocidades controladas que permite movimientos de rotación sobre su eje y planetario alrededor del eje del recipiente de sentidos opuestos.

A continuación se describe el procedimiento seguido para todas las amasadas:

- Se introducen los componentes secos en el cubilote de la amasadora y se mezclan durante 30 segundos a velocidad lenta.
- Se añade un cuarto del total de agua necesaria y se mezcla a velocidad lenta durante 30 segundos más.
- Se añade el siguiente cuarto de agua y se mezcla otros treinta segundos a velocidad lenta.
- Pasados los treinta segundos se introduce la mitad restante de agua y se mezcla durante 30 segundos más a velocidad lenta.
- Seguidamente se para la máquina y se cambia a la velocidad rápida mezclando durante 30 segundos más.
- Se para la amasadora durante 1 minuto y 30 segundos. Durante los 15 segundos iniciales se repasa el sobrante de pasta adherido a los bordes del cubilote con una paleta o espátula
- Por último, después 1 minuto y 30 segundos, se vuelve a amasar durante 60 segundos a velocidad rápida.
- Una vez amasado el producto, es conveniente dejarlo reposar aproximadamente 5 minutos antes de su uso, para permitir un correcto desarrollo de los aditivos que lleva incorporados.

2.3.2. Capacidad de retención de agua por succión.

De la capacidad de retención de agua depende la trabajabilidad del mortero fresco. La retención de agua se halla íntimamente relacionada con la superficie específica de las partículas de árido fino, así como con el conglomerante y, en general, con la viscosidad de la pasta. Un mortero tiende a conservar el agua precisa para hidratar la superficie de las partículas del conglomerante y árido, además de las burbujas de aire ocluido. El agua que tenga en exceso la cederá fácilmente por succión del soporte sobre el que se aplica.

La retención de agua influye en el grado de hidratación del conglomerante, lo que determinará el ritmo de endurecimiento del mortero.

Así, según publica AFAM¹ en su guía “Al aplicar un mortero sobre un soporte es fundamental que éste se encuentre humedecido para que no capture el agua de amasado retenida por el mortero. De este modo se reduce la succión que el soporte realiza sobre el mortero en estado fresco.

Otro factor que favorece este «robo» de agua al mortero proviene de los agentes externos (temperaturas elevadas, viento, etc.). Ante estos casos es recomendable reponer el agua sustraída, mediante el curado del mortero en su proceso de fraguado.

Un mortero bien dosificado y amasado puede llegar a desprenderse y no adquirir resistencia ni adherencia por falta de hidratación del cemento, si no se consideran estos factores”.

La capacidad de retención de agua por succión para morteros frescos se determina de acuerdo a norma (UNE_83816-EX, 1993).

2.3.2.1. Fundamento.

La capacidad de retención de agua de una muestra de mortero fresco, con una consistencia determinada, se mide por la cantidad de agua retenida en un papel de filtro cuando se la somete a un tratamiento de succión normalizado, expresándose el resultado en tanto por ciento absorbido respecto a la cantidad de agua inicial.

2.3.2.2. Aparatos.

Los aparatos necesarios para el ensayo son los siguientes:

- Un molde rígido de medidas normalizadas.
- Una espátula.
- Una balanza de precisión.
- Una pesa de 2 kg.
- Un vidrio plano o placa de plástico de 100 mm de diámetro y 5 mm de espesor.
- Dos discos de gasa de algodón de 100 mm de diámetro o cuadrados.
- Ocho discos de papel de filtro de 180-220 g/m³ y 100 mm de diámetro.

2.3.2.3. Procedimiento.

Se ensayarán dos muestras de mortero. Cada una de ellas se ensayará no antes de 10 min ni después de 30 min a partir del amasado y sin realizar ningún proceso adicional antes del ensayo.

¹ AFAM, Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero, San Bernardo, 20 - 1º - 28015 Madrid.
[email:afam@afam.es](mailto:afam@afam.es)

El procedimiento es el siguiente (Fig. 2–7):

- Primeramente se pesan, por un lado, las dos piezas de gasa de algodón secas junto con los ocho discos de papel de filtro también secos, y por otro lado, el vidrio junto con el molde limpio.



a).- Cilindro, vidrio y papeles de filtro.



b).- Aplicación de la carga de 2 kg.

Fig. 2–7 Ensayo de determinación de la capacidad de retención de agua por succión del mortero fresco.

- Después se llena perfectamente el molde con la muestra de mortero, se cubre la superficie de mortero con las dos piezas de gasa de algodón y se colocan los ocho discos de papel de filtro sobre las gasas. A continuación se coloca la placa de vidrio (o plástico) no porosa encima y se invierte el molde colocándolo sobre una superficie plana para, seguidamente, cargarlo con la pesa de 2 kg durante 5 min.
- Transcurrido ese tiempo se retiran las gasas de algodón y los papeles de filtros que estarán húmedos por el agua absorbida de la muestra de mortero y se pesan. Se pesan también el vidrio con el molde y la muestra de mortero en su interior.
- Finalmente se calcula la cantidad de agua inicial presente en el molde a partir del valor conocido en su composición y de la masa de mortero. Si no se supiera dicho contenido porque no se conoce su composición, se determinaría por secado hasta peso constante.

La capacidad de retención de agua se calcula como la relación entre el agua presente en el mortero fresco después de realizado el ensayo, y el agua del mortero antes del mismo, expresando el resultado en tanto por ciento respecto de la cantidad de agua inicial, es decir:

$$\text{Retención de Agua [\%]} = \frac{(\text{Agua inicial} - \text{Agua absorbida})}{\text{Agua inicial}} \cdot 100$$

2.3.2.4. Resultados.

En la Tabla 2–2 y en la Tabla 2–3 se expresan los resultados de este ensayo llevado a cabo para dos muestras de mortero que han sido amasadas según norma (UNE-EN_1015-2, 1999) para una cantidad de agua del 24% tal y como se ha descrito en la preparación de muestras para los ensayos de mortero fresco.

MUESTRA 1					
PESOS [g]		AGUA ABSORBIDA [g] (B - A)			
A	Gasas + Filtros (SECOS) = 16,69	0,88	PESO TOTAL [g] (Agua abs. + Mortero)	AGUA INICIAL [g] 24 % peso total	RETENCIÓN DE AGUA %
B	Gasas + Filtros (HÚMEDOS) = 17,57				
PESOS [g]		PESO MORTERO [g] (D - C)			
C	Vidrio + Molde = 873,80	327,10	327,98	78,72	98,88
D	Vidrio + Molde + Mortero= 1200,90				

Tabla 2–2 Resultados de la capacidad de retención de agua por succión para mortero fresco. Muestra 1.

MUESTRA 2					
PESOS [g]		AGUA ABSORBIDA [g] (B - A)			
A	Gasas + Filtros (SECOS) = 16,60	1,21	PESO TOTAL [g] (Agua abs. + Mortero)	AGUA INICIAL [g] 24 % peso total	RETENCIÓN DE AGUA %
B	Gasas + Filtros (HÚMEDOS) = 17,81				
PESOS [g]		PESO MORTERO [g] (D - C)			
C	Vidrio + Molde = 873,80	347,30	348,51	83,64	98,55
D	Vidrio + Molde + Mortero= 1221,10				

Tabla 2–3 Resultados de la capacidad de retención de agua por succión para mortero fresco. Muestra 2.

Luego el resultado final de la capacidad de retención de agua para este mortero será la media de los valores de las dos muestras:

$$\text{RETENCIÓN DE AGUA} = \frac{98,88 + 98,55}{2} = 98,72\%, \text{ redondeando } \mathbf{99\%}$$

2.3.2.5. Conclusiones.

La capacidad de retención de agua obtenida por este ensayo para este mortero ha sido del 99%, valor no muy alejado al especificado en el DIT del 96%, aunque este último se calculó mediante un procedimiento diferente, el especificado en el IETcc 2669-4.

2.3.3. Consistencia.

Desde la perspectiva de la trabajabilidad hacemos referencia al concepto de consistencia como la coherencia de las partículas que constituyen una masa. Va a depender fundamentalmente de la proporción de agua contenida y de los aditivos fluidificantes.

La trabajabilidad se logra con morteros de consistencia plástica que permiten a la pasta conglomerante bañar la superficie del árido. Los morteros secos tienen la ventaja de que, cuando endurecen, adquieren más resistencia al no tener tanta agua que al evaporarse deje oquedades, pero por el contrario no son trabajables, sobre todo si son excesivamente secos. Los morteros muy fluidos tienen el problema de que se puede producir la segregación del árido lo que generará una mezcla no homogénea con una posible merma en las propiedades finales del mortero endurecido.

El valor de la consistencia, también denominado escurrimiento, se determina de acuerdo a norma (UNE-EN_1015-3, 2003).

Vamos a calcular la consistencia para el mortero a estudio con el 24% de agua en peso que, como se indicó anteriormente, es el porcentaje de agua con el que recomienda el fabricante realizar la puesta y con el que se han amasado las muestras para este ensayo.

2.3.3.1. Fundamento.

El valor de la consistencia se determina midiendo el diámetro medio de una muestra de mortero fresco colocado, con ayuda de un molde determinado, sobre el disco de una mesa de sacudidas normalizada, en donde se somete a un determinado número de movimientos verticales, levantando la mesa y dejándola caer libremente desde una altura determinada.

2.3.3.2. Aparatos.

Los elementos necesarios para este ensayo son los siguientes:

- Una mesa de sacudidas.
- Un molde troncocónico de medidas estandarizadas.
- Regla de enrasar u otro utensilio que cumpla la misma función.
- Líquido desencofrante.
- Un calibre.

2.3.3.3. Procedimiento.

Se ensayarán al menos dos muestras de mortero. Cada una de ellas se ensayará no antes de 10 min ni después de 30 min a partir del amasado, y sin realizar ningún proceso adicional antes del ensayo.

El procedimiento es el siguiente (Fig. 2–8):

- Primeramente se aplica lubricante en la superficie interior del molde troncocónico que servirá como desencofrante para facilitar la salida del mortero y así evitar movimientos bruscos que provoquen fallos durante el ensayo.
- Seguidamente se coloca el molde troncocónico de forma centrada sobre la plataforma de la mesa de sacudidas, se llena de mortero hasta la mitad y se compacta. Después se repite el mismo paso hasta llenar el molde completamente y se enrasa para retirar el mortero sobrante. Es posible que debido a la compactación salga por la base del molde lubricante o agua de amasado, si sucede se retira.
- De forma vertical lentamente y de manera continuada se efectúan 15 golpes con la mesa de sacudidas a razón de uno por segundo.
- La pasta asienta y se mide el diámetro de esta con el calibre en dos direcciones perpendiculares entre sí.

El valor de la consistencia o escurrimiento de cada muestra, será el valor medio del diámetro de las mediciones.

$$\text{Consistencia [mm]} = \frac{\phi_1 + \phi_2}{2}$$

En función de esta medida se distinguen tres tipos de consistencia (Tabla 2–4):

Mortero Fresco	Consistencia (Ecurrimiento en mm)	Designación
Seco	< 140	S
Plástico	140 a 200	P
Fluido	> 200	F

Tabla 2–4 Designación del mortero fresco en función del valor de la consistencia.

2.3.3.4. Resultados.

En la Tabla 2–5 se dan los resultados de tres muestras de mortero.

Consistencia [mm]	
Muestra 1	143
Muestra 2	145
Muestra 3	142
Valor medio =	143

Tabla 2–5 Resultados del ensayo para determinación de la consistencia del mortero fresco.



a).- Mesa de sacudida y molde troncocónico.

b).- Medida del diámetro de la torta de mortero.

Fig. 2-8 Ensayo de determinación de la consistencia del mortero fresco.

2.3.3.5. Conclusiones.

El **valor medio de la consistencia** para las 3 muestras de mortero ensayadas con un 24% de agua en peso ha sido de **143 mm (consistencia plástica)**, valor que es algo inferior al especificado en el DIT de 148 mm para el mismo porcentaje de agua.

2.3.4. Densidad aparente.

La densidad del mortero está directamente relacionada con la de sus materiales componentes, así como con su contenido en aire.

La densidad aparente para morteros frescos se determina mediante un procedimiento de ensayo normalizado (UNE-EN_1015-6, 1999).

2.3.4.1. Fundamento.

Para poder determinar la densidad aparente es preciso dividir su masa por el volumen que ocupa cuando se introduce, siguiendo el procedimiento prescrito en la norma, en un recipiente de medida estándar.

2.3.4.2. Aparatos.

Los aparatos necesarios para el ensayo son los siguientes:

- Recipiente de medida normalizado de 1 litro de capacidad.
- Mesa vibradora (sólo para consistencia seca).
- Balanza de precisión en miligramos.
- Utensilios para rellenar el recipiente, como una paleta, pala o cuchara, y para enrasar el mortero, como una regla.

2.3.4.3. Procedimiento.

Se ensayarán dos muestras de mortero. Se respetará la proporción o relación agua/cemento usada para el ensayo anterior de cálculo de la consistencia como se explica en el punto de preparación de muestras para mortero fresco.

El procedimiento es el siguiente (Fig. 2–9):

- Antes del ensayo, la mezcla amasada se debe agitar suavemente con el fin de evitar cualquier falso fraguado, etc., pero sin realizar un amasado adicional.
- Primeramente se pesa el recipiente vacío en la báscula (m_1).



a).- Recipiente con mortero compactado.

b).- Peso del recipiente de 1 l. de capacidad.

Fig. 2–9 Ensayo de determinación de la densidad aparente del mortero fresco.

- Posteriormente se llena el recipiente de 1 l. de capacidad y se compacta. El llenado y la compactación dependerá de la consistencia del mortero obtenida en el ensayo anterior de acuerdo con la Tabla 2–6.

Consistencia de utilización	Valor de la consistencia [mm]	Procedimiento operatorio
Mortero seco	< 140	Ensayar el mortero según llenado y compactación por el método de vibración.
Mortero plástico	140 a 200	Ensayar el mortero según llenado y compactación por el método de vibración o según llenado y compactación por el método de sacudidas.
Mortero fluido	> 200	Ensayar el mortero según método de rellenado.

Tabla 2–6 Procedimientos operatorios para determinar la densidad aparente de los morteros.

- Llenado y compactación por el método de vibración: se llena el recipiente con mortero hasta rebosar y se coloca en la mesa vibradora donde se vibra hasta que no se observe asentamiento. Si fuese necesario se añadirá más mortero hasta que se desborde.
- Llenado y compactación por el método de sacudidas: se llena el recipiente con mortero hasta aproximadamente la mitad y se compacta basculando el recipiente dejándolo caer. Después se rellena hasta el borde superior y se vuelve a compactar del mismo modo. Si fuese necesario se añadirá más mortero hasta que desborde.

- Método de rellenado: se rellena hasta que se desborde el recipiente de medida con mortero vertiéndolo desde el centro hacia la superficie exterior para evitar así la inclusión de burbujas de aire.
- Después del llenado y compactado por cualquiera de los procedimientos se enrasa para eliminar el material sobrante del recipiente y se limpia el borde.
- Finalmente se vuelve a pesar el recipiente lleno de mortero (m_2).

Para cada muestra, la densidad aparente del mortero se calcula dividiendo la masa de la pasta de mortero entre su volumen o volumen del recipiente (1 l.), es decir:

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V_V}$$

donde,

ρ_m es la densidad aparente del mortero fresco, en kg/m^3 .

m_1 es la masa del recipiente vacío, en g.

m_2 es la masa del recipiente lleno de mortero, en g.

V_V es el volumen del recipiente de medida, en l (1 l.).

La densidad aparente será igual al valor medio de las dos determinaciones.

2.3.4.4. Resultados.

En la Tabla 2–7 siguiente se expresan los resultados de este ensayo llevado a cabo para dos muestras de mortero que han sido amasadas según la norma UNE-EN 1015-2:1998 para una cantidad de agua del 24%. La consistencia que se obtuvo fue de 133 mm < 140 mm luego se trata de un mortero seco y por tanto se ha seguido el método de vibración para el llenado y compactado de la muestra.

	V_V	m_1	m_2	ρ_m	Media	DIT (24% agua)
	[l]	[g]	[g]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]
Muestra 1	1	1.259	2.987,1	1.728	1.726	1.733
Muestra 2	1	1.259	2.983,4	1.724		

Tabla 2–7 Resultados del ensayo para determinación de densidad aparente del mortero fresco.

2.3.4.5. Conclusiones.

La densidad aparente obtenida por este ensayo para este mortero ha sido de 1.726 kg/m^3 , valor muy próximo al especificado en el DIT de 1.733 kg/m^3 .

2.3.5. Contenido en aire.

Resulta un parámetro altamente influyente en el conjunto de propiedades del mortero, a mayor cantidad de aire ocluido menor es la resistencia a compresión del mortero obtenida. No obstante, un cierto contenido en aire puede beneficiar otras propiedades.

Lo ideal es aplicar el mortero una vez amasado, reduciendo el periodo de tiempo que queda almacenado hasta su disposición. La razón es evitar que se inhiba la hidratación del conglomerante debido a la aireación superficial y la evaporación del agua del material.

El contenido en aire para morteros frescos se determina de acuerdo a norma² (UNE-EN_1015-7, 1999).

2.3.5.1. Fundamento.

Se coloca un volumen de mortero en un recipiente de medida especificado. Se vierte agua en la superficie del mortero y, aplicando aire a presión, se fuerza la introducción del agua, desplazando así el aire contenido en los poros. La disminución del nivel de agua refleja el volumen de aire extraído del mortero.

2.3.5.2. Aparatos.

Los aparatos necesarios para el ensayo son los siguientes:

- Un recipiente normalizado compuesto de un cilindro metálico (donde irá la muestra) de 1 l. de capacidad y de una tapa metálica en la que existe una cámara de aire estanca (cámara de presión) conectada a un manómetro para medir la presión de aire aplicada.
- Un pisón de dimensiones y masa normalizado.
- Utensilios para rellenar como paleta, pala o cuchara y para enrasar como regla.

2.3.5.3. Procedimiento.

El procedimiento para el método de presión (para morteros cuyo contenido en aire sea inferior al 20% es el siguiente (Fig. 2–10):

- Antes del ensayo, la mezcla amasada se debe agitar suavemente con el fin de evitar cualquier falso fraguado, etc., pero sin realizar un amasado adicional.
- Primeramente se realiza el llenado del recipiente en cuatro capas aproximadamente iguales que se compactan con 10 golpes de pisón. Finalmente se enrasa eliminando el material sobrante y se limpia y seca el exterior.
- Después se cierra la válvula principal de aireación situada entre la cámara de aire y el recipiente para la muestra y se llena con agua el espacio de aire que se encuentra

² Existen dos procedimientos normalizados: el método de presión y el método del alcohol. En este caso se ha utilizado el método de presión por lo que sólo se va a explicar lo referente a este.

debajo de la cubierta y encima del mortero, dejando que ese aire que se encuentra encima de la superficie del mortero salga.

- Finalmente se inyecta aire en la cámara hasta que se haya alcanzado una presión estable. Se cierran todas las válvulas y se abre la comunicada con el recipiente. Cuando se alcance el equilibrio, se lee el contenido de aire en el manómetro y se anota este valor.



a).- Enrasado del recipiente.

b).- Lectura de la presión.

Fig. 2–10 Ensayo de determinación del contenido en aire en el mortero fresco.

Para cada muestra de mortero, el contenido en aire se refleja por la disminución de la presión en la cámara que se lee en el manómetro, en tanto por ciento.

Finalmente dicho contenido se calcula como el valor medio de los dos valores individuales de cada muestra de mortero ensayada.

2.3.5.4. Resultados.

En la Tabla 2–8 se expresan los resultados de este ensayo llevado a cabo para dos muestras de mortero que han sido amasadas según la norma (UNE-EN_1015-2, 1999).

Contenido en aire [%]	
Muestra 1	15
Muestra 2	15
Valor medio =	15

Tabla 2–8 Resultados del ensayo para determinación del contenido en aire en el mortero fresco.

2.3.5.5. Conclusiones.

El contenido en aire obtenido por este ensayo para este mortero ha sido del 15%. El DIT no da este porcentaje, lo que hace es calcular la estabilidad al aire ocluido a partir de la consistencia y la densidad aparente para un tiempo de 0 min, 15 min y 30 min desde el amasado, por lo que no se pueden comparar.

2.4. Mortero endurecido.

Los ensayos que se van a realizar al mortero son a los 28 días de edad, que es cuando ha adquirido casi toda su resistencia y serán los pertinentes según normativa para determinar todas las propiedades que van a caracterizar a nuestro mortero monocapa en estudio, ONEXIT Universal.

2.4.1. Preparación de las muestras.

Para la realización de estos ensayos será necesaria la fabricación de una serie de probetas. En este punto se va a describir cómo se van a preparar estas probetas en cuanto al amasado, enmoldado, curado y desmoldado de acuerdo a lo especificado en la normativa correspondiente. Se va a establecer además la planificación de las fechas de amasado así como la numeración o referenciado de las probetas fabricadas para los diferentes ensayos a realizar que van a ser de:

- Resistencia a Flexotracción.
- Resistencia a Compresión.
- Retracción.
- Densidad.
- Módulo de deformación dinámico.

La preparación de las probetas a usar para estos ensayos se va a realizar con una proporción de agua del 24% en peso tal y como se establecía en punto anterior y el amasado se realizará de la forma que se ha descrito en ese mismo punto.

Una vez amasada la cantidad suficiente de mortero se realiza el enmoldado de las muestras. Para los ensayos de mortero endurecido es necesario la fabricación de unas probetas siguiendo un procedimiento normalizado (UNE-EN_196-1, 2005; UNE-EN_1015-11, 2000) que, para la determinación de las resistencias mecánicas, deben de ser prismáticas de dimensiones 40 x 40 x 160 mm. Sin embargo, para la determinación de la retracción del mortero serán prismáticas de dimensiones 25 x 25 x 285 mm (Fig. 2-11).

A continuación se describen los procesos de enmoldado, curado y posterior desmoldado de las probetas.

2.4.1.1. Enmoldado de las probetas.

El enmoldado de las probetas es una operación importante porque de la forma de llevarlo a cabo dependerá la calidad de las probetas y, por lo tanto, los resultados finales de los ensayos.

Para la preparación de las muestras después de haber sido amasado el mortero se van a necesitar los siguientes aparatos:

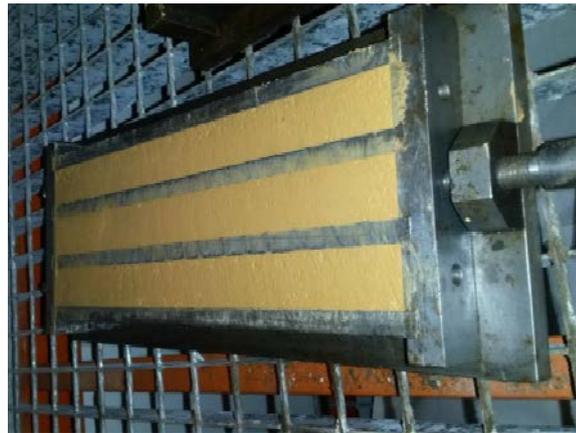
- Moldes de dimensiones normalizadas compuestos de un cuadro abierto de paredes móviles que forman tres compartimentos cuando están montados (Fig. 2–11).
- Un pisón de dimensiones y masa normalizado, compuesto de una barra redonda, rígida y no absorbente y de una cara de apisonado plana que es perpendicular al eje del pisón.
- Líquido lubricante.
- Utensilios para rellenar como paleta, pala o cuchara y para enrasar como regla.

Independientemente del tipo de molde, la metodología utilizada es siempre la misma:

- Lubricación de las caras en contacto con la pasta de mortero.
- Incorporación de una primera tongada de mortero y compactación mediante la mesa de sacudidas.
- Incorporación de una segunda tongada hasta llenar el molde y repitiendo el compactado.
- Enrasado de la superficie exterior para extraer el mortero sobrante.



a).- Molde para probetas de 40 x 40 x 160 mm.



b).- Molde para probetas de 25 x 25 x 285 mm.

Fig. 2–11 Moldes para la fabricación de probetas para ensayos de caracterización del mortero.

2.4.1.2. Curado de las probetas.

A fin de tener una óptima hidratación y endurecimiento del mortero y para evitar elevadas retracciones que puedan alterar sus propiedades, las probetas se aíslan durante la primera semana de curado en una cámara húmeda. Esta consiste en una habitación donde las condiciones de temperatura y humedad están controladas mediante un sistema de humidificación que mantiene el ambiente interior con una humedad relativa del 95% ($\pm 5\%$) y una temperatura de 20°C ($\pm 2^\circ\text{C}$).



Fig. 2-12 Almacenaje de las probetas en el cuarto de curado.

Posteriormente, una vez ya desmoldadas, se almacenarán hasta la fecha de ensayo en un cuarto de curado con una humedad relativa menor del 65% ($\pm 5\%$) y la misma temperatura de 20°C ($\pm 2^{\circ}\text{C}$), Fig. 2-12.

2.4.1.3. Desmoldado de las probetas.

En nuestro caso, todas las probetas han sido desmoldadas a las 48 horas, porque se considera una edad en la que el mortero monocapa ha adquirido la dureza suficiente para no romperse durante este proceso. Una vez sacadas del molde se procede a la numeración de las probetas para ser llevadas de nuevo a la cámara húmeda donde seguirán el proceso de curación para posteriormente, como se ha indicado, trasladarlas al cuarto de curado hasta el día del ensayo.



a).- Probetas de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$.



b).- Probetas de $25 \times 25 \times 285 \text{ mm}^3$.

Fig. 2-13 Tipologías de probetas para ensayos de caracterización del mortero a los 28 días.

2.4.1.4. Numeración de las probetas.

Se han planificado 3 series de preparación de probetas para la caracterización del mortero, cuyas fechas han sido condicionadas por las fiestas navideñas, puesto que los ensayos hay que realizarlos a los 28 días. En cada serie se han realizado 3 amasadas, puesto que la capacidad de la amasadora sólo permite rellenar 2 moldes de 3 probetas por amasada.

De esta forma se han rellenado 18 moldes que han sido numerados del MP01 al MP18, identificando a cada una de las tres probetas del molde con las letras A, B y C. En total se han fabricado 54 probetas, de las cuales 36 son de dimensiones normalizadas de 40 x 40 x 160 mm y las otras 18, destinadas a los ensayos de retracción, de dimensiones 25 x 25 x 285 mm (Fig. 2–13).

Se considera que este número de probetas fabricadas es el suficiente para realizar los ensayos de caracterización del producto endurecido.

En la Tabla 2–9 se han resumido todos los datos referentes a la preparación de las probetas: Fechas, Numeración, Tipología y Ensayos a realizar.

Fecha Amasada	Fecha Ensayo	Probetas	Nº	Tipo	Ensayo	
11/11/2014	09/12/2014	MP01	A, B, C	3	40 x 40 x 160 mm ³	Flexotracción y Compresión
		MP02	A, B, C	3		
		MP03	A, B, C	3	40 x 40 x 160 mm ³	Módulo de Elasticidad y Densidad
		MP04	A, B, C	3		
		MP05	A, B, C	3	25 x 25 x 285 mm ³	Retracción
		MP06	A, B, C	3		
18/11/2014	16/12/2014	MP07	A, B, C	3	40 x 40 x 160 mm ³	Flexotracción y Compresión
		MP08	A, B, C	3		
		MP09	A, B, C	3	40 x 40 x 160 mm ³	Módulo de Elasticidad y Densidad
		MP10	A, B, C	3		
		MP11	A, B, C	3	25 x 25 x 285 mm ³	Retracción
		MP12	A, B, C	3		
16/12/2014	13/01/2015	MP13	A, B, C	3	40 x 40 x 160 mm ³	Flexotracción y Compresión
		MP14	A, B, C	3		
		MP15	A, B, C	3	40 x 40 x 160 mm ³	Módulo de Elasticidad y Densidad
		MP16	A, B, C	3		
		MP17	A, B, C	3	25 x 25 x 285 mm ³	Retracción
		MP18	A, B, C	3		

Tabla 2–9 Amasadas y numeración de probetas para ensayos de caracterización del mortero a los 28 días.

2.4.2. Resistencia a flexotracción.

La resistencia a la flexotracción, así como la resistencia a compresión que se determinará posteriormente son propiedades que determinan la resistencia mecánica de un mortero y son valores comúnmente adoptados para su caracterización.

La resistencia a flexotracción del mortero endurecido a los 28 días se determina de acuerdo a norma (UNE-EN_1015-11, 2000).

2.4.2.1. Fundamento.

La resistencia a flexión (flexotracción³) de un mortero se determina aplicando a una probeta prismática del material hasta su rotura una carga puntual en su centro mientras permanece apoyada en los extremos.

2.4.2.2. Aparatos.

Los dispositivos y equipos necesarios para este ensayo son:

- Una prensa capaz de aplicar una carga a una velocidad uniforme.
- Un adaptador para la prensa que se usa para la realización de los ensayos de flexión y de compresión que consta de un cuerpo inferior fijo donde se coloca la probeta y un pistón que transmite la carga aplicada a la probeta desde la parte inferior.
- Un dispositivo que es propio para la realización de este ensayo de flexión provisto de dos rodillos de apoyo en acero espaciados entre sí 100 mm, y de un tercer rodillo de carga instalado centralmente entre los rodillos de apoyo. Uno de los rodillos de apoyo y el rodillo de carga deben poder oscilar ligeramente para permitir una distribución uniforme de la carga sobre el total del ancho del prisma sin someterlo a un esfuerzo de torsión.
- Una célula de carga con su correspondiente lector en caso de que la prensa no tenga una incorporada.

2.4.2.3. Procedimiento.

Se ensayarán al menos tres probetas de mortero endurecido que deben ser prismáticas de 40 x 40 x 160 mm preparadas como se ha explicado anteriormente.

³ La norma habla de resistencia a flexión pero en realidad es a flexotracción porque al someter la probeta de un material como el mortero a flexión por aplicación de una carga puntual cuando la probeta está apoyada en dos puntos, esta romperá cuando la tensión de las fibras inferiores de la sección de rotura que están sometidas a tracción sobrepase la tensión admisible, es decir, que romperá porque las fibras inferiores no soporten la tracción a la que van a estar sometidas. Por lo tanto, como romperá a tracción se habla de flexotracción en lugar de flexión.

Este ensayo para determinar la resistencia a flexotracción es muy simple, Fig. 2–14:

- Se coloca la probeta en la máquina apoyándola sobre los rodillos del soporte del adaptador de flexión, de forma que el rodillo superior quede centrado en la cara superior de la probeta. La única precaución que hay que tener es que la cara rugosa que no ha estado en contacto con el molde ha de quedar libre para evitar resultados erróneos.
- Colocada la probeta, se pone en marcha la prensa a la velocidad uniforme comprendida entre 10 N/s y 50 N/s, de tal modo que la rotura se produzca entre 30 s y 90 s. En este caso, como se trata de un mortero monocapa para revestimiento que es un material relativamente fácil de romper, se aplica una velocidad uniforme de 15 N/s.
- El lector de carga comienza a medir hasta que la probeta llega a la rotura. Se anota entonces la carga máxima aplicada dada por el lector.

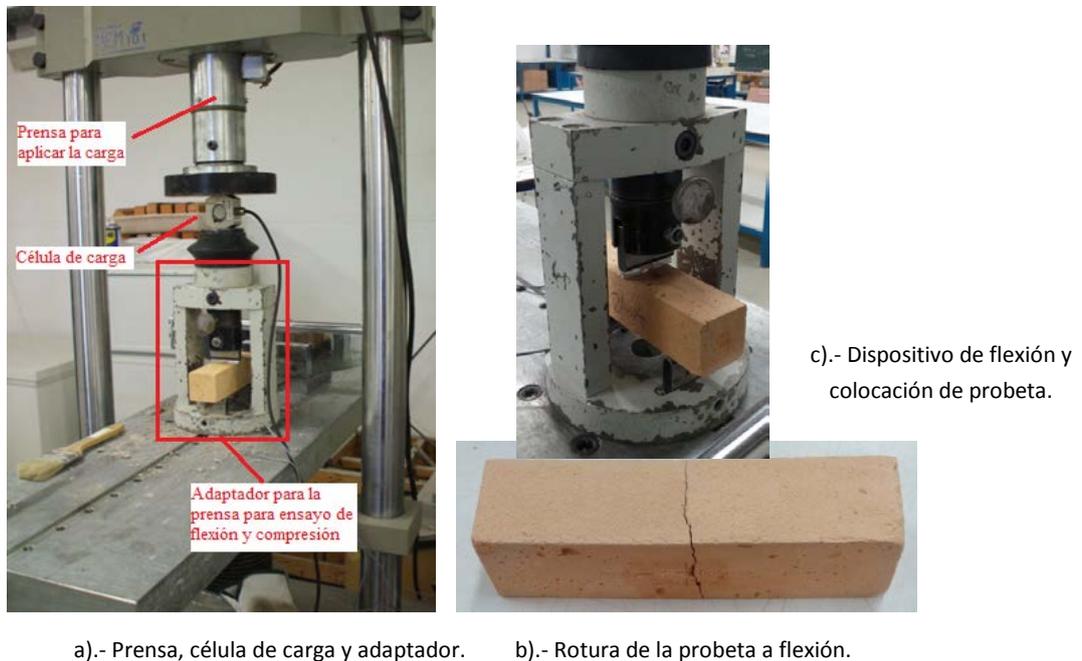


Fig. 2–14 Ensayo de determinación de la resistencia a flexión del mortero endurecido.

La resistencia a flexotracción, en MPa, para cada probeta de mortero se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$\text{Resistencia a flexotracción [MPa]} = 1,5 \cdot \frac{F \cdot L}{b \cdot d^2}$$

donde,

F es la carga máxima aplicada a la probeta en newtons [N].

L es la distancia entre ejes de apoyo en milímetros [mm] $\Rightarrow L = 100$ mm.

b es el ancho de la probeta en milímetros [mm]

d es el grosor de la probeta en milímetros [mm]

} Para probetas de sección cuadrada de lado 40 mm $\Rightarrow b = 40$ mm y $d = 40$ mm

Luego realmente la expresión anterior para las probetas de 40 mm x 40 mm x 160 mm queda:

$$\text{Resistencia a flexotracción [MPa]} = 1,5 \cdot \frac{F[N] \cdot 100 \text{ mm}}{40 \text{ mm} \cdot (40 \text{ mm})^2}$$

La resistencia final será el valor medio de todas las probetas de mortero ensayadas.

2.4.2.4. Resultados.

Como se planteó en el apartado de preparación de muestras para caracterización del mortero endurecido a los 28 días, este ensayo se ha realizado para cada uno de los tres especímenes A, B y C de las series MP01, MP02, MP07, MP08, MP13 y MP14, lo que supone un total de 18 probetas.

En la Tabla 2–10 se resumen todos los datos referentes a los ensayos de flexotracción realizados a las mencionadas probetas.

Probeta	Fecha Amasada	Fecha Ensayo	Fuerza Prensa [kN]	Flexotracción [MPa]	DIT
MP01A			1,12	2,63	
MP01B			1,10	2,58	2,65
MP01C	11/11/2014	09/12/2014	1,20	2,81	2,0
MP02A			1,08	2,53	
MP02B			1,13	2,65	2,65
MP02C			1,20	2,81	
MP07A			1,07	2,51	
MP07B			1,02	2,39	2,65
MP07C	18/11/2014	16/12/2014	1,29	3,02	2,0
MP08A			1,20	2,81	
MP08B			0,94	2,20	2,25
MP08C			0,76	1,78	
MP13A			1,33	3,12	
MP13B			1,29	3,02	3,10
MP13C	16/12/2014	13/01/2015	1,33	3,12	2,0
MP14A			1,23	2,88	
MP14B			1,30	3,05	2,90
MP14C			1,18	2,77	

Media 2,7

Tabla 2–10 Resultados del ensayo para determinación de la resistencia a flexotracción.

2.4.2.5. Conclusiones.

La resistencia media a flexotracción de las 18 probetas ensayadas ha sido de **2,7 MPa**, superior al valor especificado en el DIT de 2 MPa.

2.4.3. Resistencia a compresión.

La resistencia a compresión es generalmente el criterio más empleado para identificar y prescribir un mortero. La razón se debe a que es una de sus propiedades más importantes y a que es fácilmente medible. Además, de ella pueden deducirse otras características.

La resistencia a compresión del mortero endurecido a los 28 días se determina de acuerdo al mismo procedimiento de ensayo normalizado (UNE-EN_1015-11, 2000).

2.4.3.1. Fundamento.

Se determina aplicando una carga sobre dos superficies opuestas de un prisma hasta su rotura. Los prismas proceden de cada una de las dos mitades (semiprismas) resultantes de la rotura de la probeta en el ensayo de la resistencia a flexión.

2.4.3.2. Aparatos.

Los dispositivos y equipos necesarios para este ensayo son:

- Una prensa capaz de aplicar una carga a una velocidad uniforme.
- Un adaptador para la prensa que se usa para la realización de los ensayos de flexión y de compresión que consta de un cuerpo inferior fijo donde se coloca la probeta y un pistón que transmite la carga aplicada a la probeta desde la parte inferior.
- Un dispositivo propio para realizar el ensayo de compresión que a diferencia del de flexotracción consta de dos platos de apoyo de 40 mm de longitud x 40 mm de ancho y 10 mm de espesor que serán de carburo de tungsteno o de acero, con una dureza de la superficie determinada.
- Una célula de carga con su correspondiente lector en caso de que la prensa no tenga una incorporada.

2.4.3.3. Procedimiento.

Se ensayarán al menos seis semiprismas procedentes del ensayo de flexotracción de tres probetas prismáticas de mortero de 40 x 40 x 160 mm.

La probeta se ensaya a los 28 días después de su confección, y después del ensayo de resistencia a flexotracción. El ensayo para determinar la resistencia a compresión es muy simple, Fig. 2–15:

- Se coloca la mitad de la probeta resultante del ensayo de flexotracción entre los dos platos del adaptador de compresión y se alinea apoyándola por la tercera cara contra dos pivotes situados en el lateral del adaptador. La cara rugosa que no ha estado en contacto con la superficie del molde ha de quedar siempre libre ya que es muy irregular y puede alterar la aplicación de la carga y con ello los resultados.

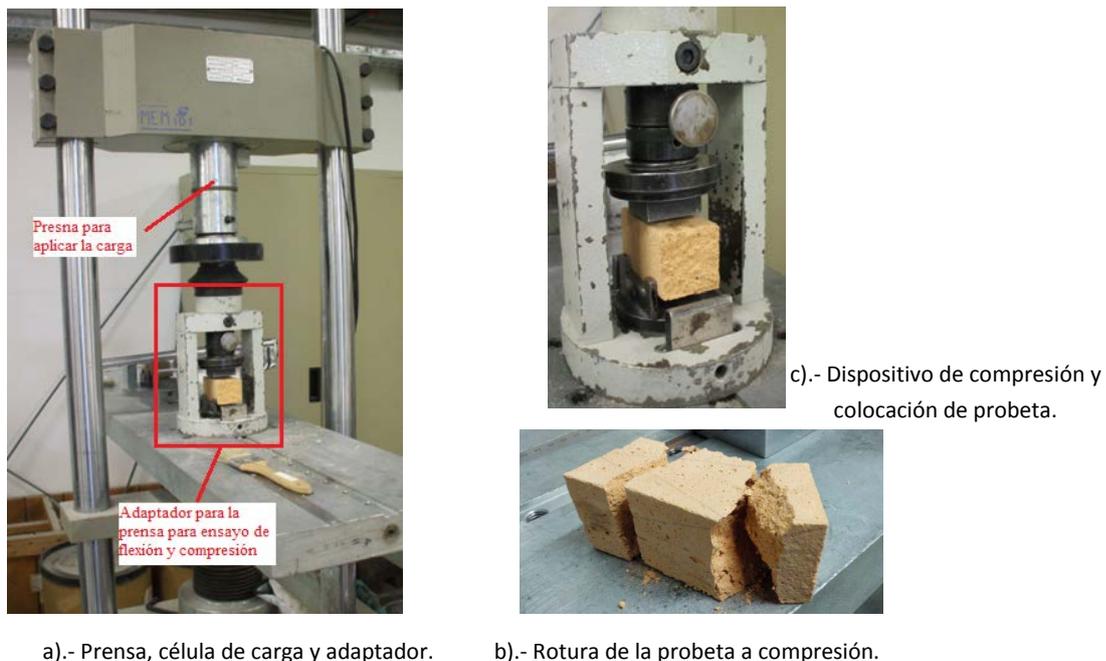


Fig. 2-15 Ensayo de determinación de la resistencia a compresión del mortero endurecido.

- Una vez colocada la probeta de forma correcta en el adaptador a compresión, se pone en marcha la prensa y se aplica la carga sin aceleraciones aumentando progresivamente a un ritmo comprendido entre 50 N/s y 500 N/s de tal modo que la rotura se produzca entre 30 s y 90 s. En el caso de mortero para revoco por tratarse de un material relativamente fácil de romper, se utiliza una velocidad uniforme de aplicación de carga lenta de 200 N/s.
- El lector comienza a medir la carga hasta que la probeta colapsa y rompe. Una vez ensayada la probeta, se para la prensa para que deje de ejercer presión y se anota la carga máxima aplicada dada por el lector.

La resistencia a compresión, en MPa, para cada probeta de mortero se calcula dividiendo la carga máxima soportadas por su sección transversal:

$$\text{Resistencia a compresión} = \frac{F}{b \cdot d}$$

donde,

F es la carga máxima aplicada a la probeta en newtons [N].

b es el ancho de la probeta en milímetros [mm]

d es el grosor de la probeta en milímetros [mm]

} Para probetas de sección cuadrada de lado 40 mm $\Rightarrow b = 40$ mm y $d = 40$ mm

Luego realmente la expresión anterior para las probetas de 40 x 40 x 160 mm queda:

$$\text{Resistencia a compresión [MPa]} = \frac{F[\text{N}]}{40 \text{ mm} \cdot 40 \text{ mm}}$$

2.4.3.4. Resultados.

Como se ha dicho, este ensayo se realiza para cada uno de los semiprismas procedentes de las probetas usadas en el ensayo anterior de flexotracción, lo que supone un total de 36 semiprobetas.

Probeta	Fecha Amasada	Fecha Ensayo	Fuerza Prensa [kN]	Compresión	[MPa]	DIT
MP01A			11,00	12,05	7,20	
MP01B			12,34	11,73	7,50	7,35
MP01C	11/11/2014	09/12/2014	11,42	12,25	7,40	7,5
MP02A			11,18	11,29	7,00	
MP02B			11,52	11,72	7,25	
MP02C			11,73	11,29	7,20	
MP07A			11,02	9,82	6,50	
MP07B			11,54	11,02	7,05	7,00
MP07C	18/11/2014	16/12/2014	12,01	11,63	7,40	7,5
MP08A			11,77	12,05	7,45	
MP08B			11,50	11,45	7,15	
MP08C			10,96	11,58	7,05	
MP13A			12,43	12,82	7,90	
MP13B			12,37	13,35	8,05	8,00
MP13C	16/12/2014	13/01/2015	13,34	12,30	8,00	7,5
MP14A			11,79	11,97	7,40	
MP14B			11,67	11,92	7,35	
MP14C			12,31	11,70	7,50	

Media 7,4

Tabla 2–11 Resultados del ensayo para determinación de la resistencia a compresión.

En la Tabla 2–11 se resumen todos los datos referentes a los ensayos de resistencia a compresión realizados. En ella aparece la carga máxima en kN aplicada a cada semiprobeta y la resistencia a compresión media tanto para las dos semiprobetas como para cada una de las muestras.

2.4.3.5. Conclusiones.

La resistencia media a compresión de las 36 semiprobetas ensayadas ha sido de **7,4 MPa**, valor muy próximo al especificado en el DIT de 7,5 MPa.

2.4.4. Densidad aparente en seco.

La densidad del mortero dependerá fundamentalmente de la que tengan sus componentes. Además, incide en la densidad la relación agua/cemento, a medida que aumenta dicha relación más poroso se vuelve este.

El contenido en aire para morteros frescos se determina de acuerdo a norma (UNE-EN_1015-10, 2000).

2.4.4.1. Fundamento.

La densidad aparente en seco de una probeta dada de mortero endurecido se determina dividiendo su masa, secada en estufa, entre el volumen que ocupa cuando se sumerge en agua, en estado saturado.

2.4.4.2. Aparatos.

Los aparatos necesarios para el ensayo son los siguientes:

- Balanza de precisión provista de un estribo porta-probetas para pesar la probeta sumergida en agua.
- Estufa ventilada.

2.4.4.3. Procedimiento.

Se ensayarán a los 28 días al menos tres probetas de mortero que deben ser prismáticas de 40 x 40 x 160 mm preparadas como se ha explicado anteriormente.

El procedimiento para calcular la densidad aparente es seco es el siguiente:

- Se seca cada probeta a ensayar en la estufa hasta que alcance masa constante ($m_{s,sec}$). Se considera que la probeta ha alcanzado masa constante cuando dos pesadas sucesivas no difieren en más de 0,2% de la masa de la probeta.
- Una vez determinada la masa seca, hay que determinar el volumen de la probeta por desplazamiento volumétrico ya que el volumen con un alto grado de exactitud es difícil de medir directamente. Así este se puede calcular de forma sencilla si se sumerge en un líquido por aplicación directa del principio de Arquímedes que dice que todo peso sumergido en un fluido experimenta un empuje hacia arriba igual al peso del volumen de fluido desalojado.

Por tanto, si se sumerge la probeta en un fluido de densidad conocida como por ejemplo agua destilada ($\rho_w = 1 \frac{kg}{dm^3} = 1 \cdot 10^6 \frac{g}{m^3}$), se puede determinar su volumen por pesada hidrostática (utilizando una balanza hidrostática) porque cuando la probeta está sumergida, además de su propio peso, sobre ella actúa el empuje del agua, que al equilibrarla, el valor de

la lectura de la balanza corresponde a la masa del cuerpo menos la masa del líquido que desaloja:

$$\begin{aligned} m_{sumergido} &= m_{probeta\ saturada} - m_{liquido\ desalojado} \\ &= m_{probeta\ saturada} - \rho_{liquido} \cdot V_{probeta} \end{aligned}$$

De donde se puede despejar el volumen del cuerpo en función de dos magnitudes (masas) que pueden medirse con la balanza y de la densidad del agua.

Luego para calcular el volumen de la probeta:

- Se sumerge ésta en agua como se muestra en la Fig. 2–16_a hasta que no se observe aumento de la masa aparente. La probeta saturada se pesa después de haber eliminado el exceso de agua con un paño húmedo y se anota su masa ($m_{s,sat}$).
- Después la probeta se pesa en la balanza hidrostática totalmente sumergida (Fig. 2–16_b) y se anota su masa ($m_{s,i}$).

El volumen de la probeta (V_s) se calcula como la diferencia de la masa saturada menos la masa sumergida ($m_{s,sat} - m_{s,i}$) dividida por la densidad del agua, será pues:

$$V_s = \frac{m_{s,sat} - m_{s,i}}{\rho_w}$$

Finalmente, la densidad aparente en seco de cada probeta de mortero se calcula dividiendo la masa de la probeta secada en estufa ($m_{s,sec}$), por el volumen de la probeta (V_s).

El valor final es el resultado de la media aritmética de los valores individuales.



a).- Probetas sumergidas en agua.

b).- Balanza hidrostática.

Fig. 2–16 Ensayo de determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido.

2.4.4.4. Resultados.

Como ya se planteó, este ensayo se ha realizado para cada una de las tres probetas A, B y C de las muestras MP03, MP04, MP09, MP10, MP15 y MP16, lo que supone un total de 18 probetas.

De la Tabla 2–12 a la Tabla 2–14 se resumen los datos de las pesas realizadas hasta alcanzar masa constante en las probetas.

Probeta	Fecha Amasada	Dimensiones	09/12/2014 (0h)	10/12/2014 (24h)	11/12/2014 (48h)	12/12/2014 (72h)
		[mm]	Peso [gr]			
MP03A			376,0	369,2	367,8	367,7
MP03B	11/11/2014	40 x 40 x 160	379,7	372,6	371,2	371,1
MP03C			380,4	373,5	372,3	372,2
MP04A			379,0	372,1	370,7	370,6
MP04B	11/11/2014	40 x 40 x 160	377,2	369,7	368,5	368,4
MP04C			379,5	372,5	371,2	371,2

Tabla 2–12 Masa seca probetas MP03 y MP04.

Probeta	Fecha Amasada	Dimensiones	16/12/2014 (0h)	17/12/2014 (24h)	18/12/2014 (48h)	19/12/2014 (72h)
		[mm]	Peso [gr]			
MP09A			398,3	381,7	381,9	381,8
MP09B	18/11/2014	40 x 40 x 160	397,2	381,2	381,2	381,1
MP09C			394,5	380,5	380,4	380,4
MP10A			385,9	373,0	373,1	373,0
MP10B	18/11/2014	40 x 40 x 160	388,6	372,8	372,7	372,7
MP10C			388,4	374,1	374,0	374,0

Tabla 2–13 Masa seca probetas MP09 y MP10.

Probeta	Fecha Amasada	Dimensiones	13/01/2015 (0h)	14/01/2015 (24h)	15/01/2015 (48h)	16/01/2015 (72h)
		[mm]	Peso [gr]			
MP15A			386,1	378,4	378,2	378,2
MP15B	16/12/2014	40 x 40 x 160	388,8	380,9	380,8	380,7
MP15C			389,2	381,3	381,0	381,0
MP16A			396,0	387,4	387,2	387,2
MP16B	16/12/2014	40 x 40 x 160	395,7	387,3	387,1	387,0
MP16C			396,4	388,0	387,7	387,7

Tabla 2–14 Masa seca probetas MP15 y MP16.

De la Tabla 2–15 a la Tabla 2–17 se resumen los datos de las pesadas realizadas para determinar el volumen de las probetas.

Probeta	Fecha Amasada	Fecha Pesadas	Dimensiones	Masa Saturada	Masa Sumergida	Volumen
			[mm]	[gr]	[gr]	[m ³]
MP03A				386,6	132,4	2,542E-04
MP03B	11/11/2014	15/12/2014	40 x 40 x 160	391,6	134,9	2,567E-04
MP03C				391,6	135,5	2,561E-04
MP04A				392,0	137,8	2,542E-04
MP04B	11/11/2014	15/12/2014	40 x 40 x 160	389,8	136,0	2,538E-04
MP04C				392,8	138,0	2,548E-04

Tabla 2–15 Volumen probetas MP03 y MP04.

Probeta	Fecha Amasada	Fecha Pesadas	Dimensiones	Masa Saturada	Masa Sumergida	Volumen
			[mm]	[gr]	[gr]	[m ³]
MP09A				415,9	152,6	2,633E-04
MP09B	18/11/2014	22/12/2014	40 x 40 x 160	407,9	145,7	2,622E-04
MP09C				406,3	143,5	2,628E-04
MP10A				396,9	141,9	2,550E-04
MP10B	18/11/2014	22/12/2014	40 x 40 x 160	397,8	143,0	2,548E-04
MP10C				398,5	143,1	2,554E-04

Tabla 2–16 Volumen probetas MP09 y MP10.

Probeta	Fecha Amasada	Fecha Pesadas	Dimensiones	Masa Saturada	Masa Sumergida	Volumen
			[mm]	[gr]	[gr]	[m ³]
MP15A				399,5	141,8	2,577E-04
MP15B	16/12/2014	19/01/2015	40 x 40 x 160	399,6	140,7	2,589E-04
MP15C				401,4	142,2	2,592E-04
MP16A				407,7	145,9	2,618E-04
MP16B	16/12/2014	19/01/2015	40 x 40 x 160	411,9	149,6	2,623E-04
MP16C				409,7	147,1	2,626E-04

Tabla 2–17 Volumen probetas MP15 y MP16.

Por tanto, la densidad aparente en seco de cada probeta de mortero será:

$$\text{Densidad aparente} = \frac{\text{masa de la probeta seca}}{\text{volumen de la probeta}} = \frac{m_{s,sec}}{V_s}$$

En las Tablas Tabla 2–18 a Tabla 2–20 se resumen los resultados obtenidos.

Probeta	Fecha Amasada	Dimensiones	Masa Seca	Volumen	Densidad	Aparente
		[mm]	[Kg]	[m ³]	[Kg/m ³]	
MP03A			0,368	2,542E-04	1.446,5	
MP03B	11/11/2014	40 x 40 x 160	0,371	2,567E-04	1.445,7	1.448
MP03C			0,372	2,561E-04	1.453,3	
MP04A			0,371	2,542E-04	1.457,9	
MP04B	11/11/2014	40 x 40 x 160	0,368	2,538E-04	1.451,5	1.455
MP04C			0,371	2,548E-04	1.456,8	

Tabla 2–18 Densidad aparente en seco probetas MP03 y MP04.

Probeta	Fecha Amasada	Dimensiones	Masa Seca	Volumen	Densidad	Aparente
		[mm]	[Kg]	[m ³]	[Kg/m ³]	
MP09A			0,382	2,633E-04	1.450,1	
MP09B	18/11/2014	40 x 40 x 160	0,381	2,622E-04	1.453,5	1.450
MP09C			0,380	2,628E-04	1.447,5	
MP10A			0,373	2,550E-04	1.462,7	
MP10B	18/11/2014	40 x 40 x 160	0,373	2,548E-04	1.462,7	1.463
MP10C			0,374	2,554E-04	1.464,4	

Tabla 2–19 Densidad aparente en seco probetas MP09 y MP10.

Probeta	Fecha Amasada	Dimensiones	Masa Seca	Volumen	Densidad	Aparente
		[mm]	[Kg]	[m ³]	[Kg/m ³]	
MP15A			0,378	2,577E-04	1.467,6	
MP15B	16/12/2014	40 x 40 x 160	0,381	2,589E-04	1.470,5	1.469
MP15C			0,381	2,592E-04	1.469,9	
MP16A			0,387	2,618E-04	1.479,0	
MP16B	16/12/2014	40 x 40 x 160	0,387	2,623E-04	1.475,4	1.477
MP16C			0,388	2,626E-04	1.476,4	

Tabla 2–20 Densidad aparente en seco probetas MP15 y MP16.

2.4.4.5. Conclusiones.

La densidad aparente en seco media de las 18 probetas ensayadas ha sido de **1.460 kg/m³**, algo inferior al valor especificado en el DIT de **1.512 kg/m³**.

2.4.5. Retracción de secado del mortero.

La retracción es una contracción que experimenta el mortero por disminución de volumen durante el proceso de fraguado y principio de endurecimiento. Dicha retracción es provocada por la pérdida de agua sobrante tras la hidratación del conglomerante.

Se ha demostrado que las retracciones son más elevadas cuanto más ricos en cemento y elementos finos son los morteros. También se ha observado que la retracción aumenta cuanto mayor es la cantidad de agua de amasado.

Para la determinación de la retracción de secado del mortero se ha seguido lo referente a la norma para cementos (UNE_80112-EX, 1989).

2.4.5.1. Fundamento.

La retracción o contracción lineal de secado se determina midiendo, en función del tiempo, la variación de longitud de las probetas prismáticas de mortero conservadas al aire, después de desmoldadas.

2.4.5.2. Aparatos.

Los aparatos y equipos necesarios para el ensayo de retracción son los siguientes:

- Un comparador de longitudes.
- Cámara o armario de conservación.

2.4.5.3. Procedimiento.

Para este ensayo, como se ha descrito en el apartado de preparación de las muestras, se van a usar probetas prismáticas de dimensiones 25 x 25 x 285 mm. Se ensayará al menos un número de cuatro.

Las probetas, inmediatamente después de sacadas de los moldes, se mantendrán hasta su ensayo en la cámara o armario de conservación mantenido a 20 °C (± 1 °C) y 50% (± 5 %) de humedad relativa.

El procedimiento operatorio para calcular la retracción de la probeta consiste simplemente en medir su longitud con un comparador en los momentos siguientes (Fig. 2–17):

- Inmediatamente después de sacar las probetas del molde, que constituye el valor inicial de la longitud (L_1).
- A las edades de 3, 7 y 28 días, contado desde la fabricación de las probetas (L_2).

En las medidas las probetas se colocarán en posición vertical.

Antes de cada serie de medidas, el comparador de longitudes se calibrará con una barra metálica de 285 mm de longitud cuyos extremos tengan la forma de las piezas de referencia que se acoplan a las probetas.

Hay que tener cuidado que las probetas no permanezcan fuera del ambiente de conservación, al efectuar las medidas a cada edad, durante un tiempo superior a 30 min.



a).- Probetas para el ensayo de retracción.



b).- Calibrador comparador.

Fig. 2-17 Ensayo de determinación de la retracción del mortero.

La variación de longitud por retracción de cada probeta de mortero se calcula, a cada edad, aplicando la siguiente fórmula:

$$\text{Retracción [\%]} = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100$$

donde,

ΔL es la variación de longitud de la probeta con relación a la longitud original $\Rightarrow L_2 - L_1$

L_0 es la longitud de la base del molde, igual a 285 mm.

Esto en %, si se quiere expresar en mm/m sería:

$$\text{Retracción [mm/m]} = \frac{\Delta L [\text{mm}]}{L_0 [\text{m}]}$$

El valor final es el resultado de la media aritmética de los valores individuales de cada probeta obtenidos a cada edad.

2.4.5.4. Resultados.

Este ensayo se he realizado para cada una de las tres probetas A, B y C de las muestras ya mencionadas con anterioridad.

En las Tabla 2–21 a Tabla 2–23 se resumen los datos de las medidas realizadas, a cada edad, de las diferentes probetas objeto del ensayo de retracción.

PROBETA	Fecha		Probeta	Referencia	Mediciones			
	Amasada	Desmolde			Desmolde	3 días	7 días	28 días
MP05A					16,796	16,773	16,587	16,529
MP05B					16,867	16,845	16,652	16,587
MP05C	11/11/2014	13/11/2014	285,000	19,650	16,911	16,903	16,711	16,653
MP06A					16,676	16,667	16,459	16,425
MP06B					16,733	16,724	16,520	16,464
MP06C					16,459	16,450	16,249	16,187

Tabla 2–21 Medidas probetas MP05 y MP06.

PROBETA	Fecha		Probeta	Referencia	Mediciones			
	Amasada	Desmolde			Desmolde	3 días	7 días	28 días
MP11A					16,903	16,897	16,681	16,649
MP11B					16,971	16,964	16,753	16,707
MP11C	18/11/2014	21/11/2014	285,000	19,650	16,419	16,380	16,211	16,165
MP12A					16,569	16,538	16,357	16,309
MP12B					16,959	16,950	16,733	16,696
MP12C					17,112	17,101	16,893	16,853

Tabla 2–22 Medidas probetas MP11 y MP12.

PROBETA	Fecha		Probeta	Referencia	Mediciones			
	Amasada	Desmolde			Desmolde	3 días	7 días	28 días
MP17A					16,866	16,850	16,637	16,600
MP17B					16,844	16,833	16,614	16,585
MP17C	16/12/2014	18/12/2014	285,000	19,650	17,001	16,984	16,773	16,765
MP18A					16,514	16,497	16,283	16,248
MP18B					16,512	16,501	16,306	16,241
MP18C					16,636	16,618	16,406	16,371

Tabla 2–23 Medidas probetas MP17 y MP18.

En las Tabla 2–24 a Tabla 2–26 adjuntas se resumen los datos obtenidos de retracción de las probetas a los 3, 7 y 28 días.

PROBETA	Retracción			DIT
	3 días	7 días	28 días	
MP05A	-0,81%	-7,33%	-9,37%	
MP05B	-0,77%	-7,54%	-9,82%	
MP05C	-0,28%	-7,02%	-9,05%	
MP06A	-0,32%	-7,61%	-8,81%	
MP06B	-0,32%	-7,47%	-9,44%	
MP06C	-0,32%	-7,37%	-9,54%	
Media	-0,47%	-7,39%	-9,34%	DIT
mm/m	-0,05	-0,74	-0,93	-0,90

Tabla 2–24 Retracción probetas MP05 y MP06.

PROBETA	Retracción			DIT
	3 días	7 días	28 días	
MP11A	-0,21%	-7,79%	-8,91%	
MP11B	-0,25%	-7,65%	-9,26%	
MP11C	-1,37%	-7,30%	-8,91%	
MP12A	-1,09%	-7,44%	-9,12%	
MP12B	-0,32%	-7,93%	-9,23%	
MP12C	-0,39%	-7,68%	-9,09%	
Media	-0,60%	-7,63%	-9,09%	DIT
mm/m	-0,06	-0,76	-0,91	-0,90

Tabla 2–25 Retracción probetas MP11 y MP12.

PROBETA	Retracción			DIT
	3 días	7 días	28 días	
MP17A	-0,56%	-8,04%	-9,33%	
MP17B	-0,39%	-8,07%	-9,09%	
MP17C	-0,60%	-8,00%	-8,28%	
MP18A	-0,60%	-8,11%	-9,33%	
MP18B	-0,39%	-7,23%	-9,51%	
MP18C	-0,63%	-8,07%	-9,30%	
Media	-0,53%	-7,92%	-9,14%	DIT
mm/m	-0,05	-0,79	-0,91	-0,90

Tabla 2–26 Retracción probetas MP17 y MP18.

2.4.5.5. Conclusiones.

La **retracción media** de las 18 probetas ensayadas ha sido de **-0,92 mm/m**, muy aproximado al valor especificado en el DIT de -0,90 mm/m.

2.4.6. Simulación numérica del módulo de deformación dinámico.

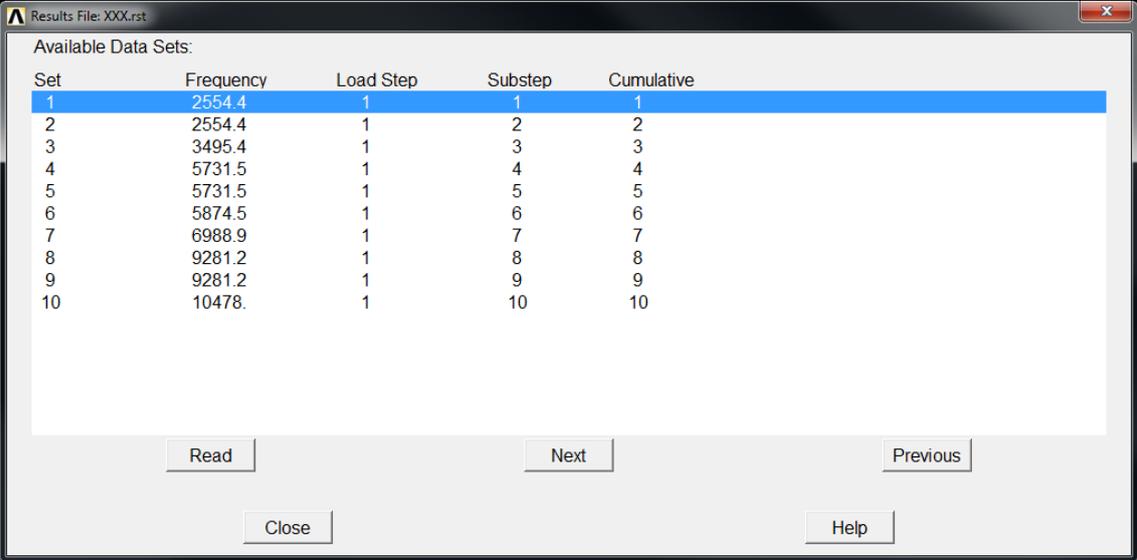
Para poder identificar correctamente las frecuencias asociadas a cada modo de vibración, se ha decidido realizar una simulación numérica utilizando una herramienta de análisis de elementos finitos y así comprobar el comportamiento real de los distintos tamaños de las probetas a estudio (40 x 40 x 160 mm, 20 x 40 x 160 mm y 15 x 40 x 160 mm) cuando son excitadas mediante una vibración por impacto.

Para caracterizar el material se ha supuesto un valor de densidad de 1.550 kg/m³ y se han adoptado como valores de las propiedades elásticas del mortero un módulo de elasticidad de 5.500 MPa y un coeficiente de Poisson de 0,20. Estos valores están en el orden de magnitud de los medidos en laboratorio y nos permiten disponer de un modelo suficientemente próximo a sus propiedades reales.

Para el mallado se han utilizado elementos hexaédricos de ocho nodos con un lado máximo de 2 mm y se ha parametrizado el modelo para adaptarlo a los distintos tamaños propuestos. Así se puede establecer y conocer cuáles son todos los modos de vibración de las probetas prismáticas del estudio y, de entre ellos, diferenciar los modos de vibración longitudinal, transversal y de torsión y las frecuencias de resonancia asociadas.

2.4.6.1. Probetas prismáticas de 40 x 40 x 160 mm.

Si se simula la probeta prismática de 40 x 40 x 160 mm mediante el programa de elementos finitos se obtienen los valores de la frecuencia natural para los modos de vibración fundamental indicados en la Tabla 2–27.



Set	Frequency	Load Step	Substep	Cumulative
1	2554.4	1	1	1
2	2554.4	1	2	2
3	3495.4	1	3	3
4	5731.5	1	4	4
5	5731.5	1	5	5
6	5874.5	1	6	6
7	6988.9	1	7	7
8	9281.2	1	8	8
9	9281.2	1	9	9
10	10478.	1	10	10

Tabla 2–27 Modos de vibración y frecuencias naturales para probetas de 40 x 40 x 160 mm.

Los dos primeros modos son de flexión y en este caso, por ser una probeta de sección cuadrada, tienen el mismo valor de frecuencia y el tercer modo es el de torsión. Por su parte, el módulo de elasticidad dinámico longitudinal se basa en la excitación del modo de vibración a compresión por lo que coincide con el modo de vibración 6.

Cabe destacar que con el programa también se puede determinar la frecuencia para más modos de vibración como por ejemplo los de doble flexión, modos 4 y 5, aunque sólo se van a considerar los necesarios para hacer una comparación con los que mediremos en el ensayo dinámico.

A continuación se incluyen la Fig. 2-18 con los modos de vibración simulados para la probeta prismática de 40 x 40 x 160 mm y unos gráficos detallados, Fig. 2-19 a Fig. 2-24.

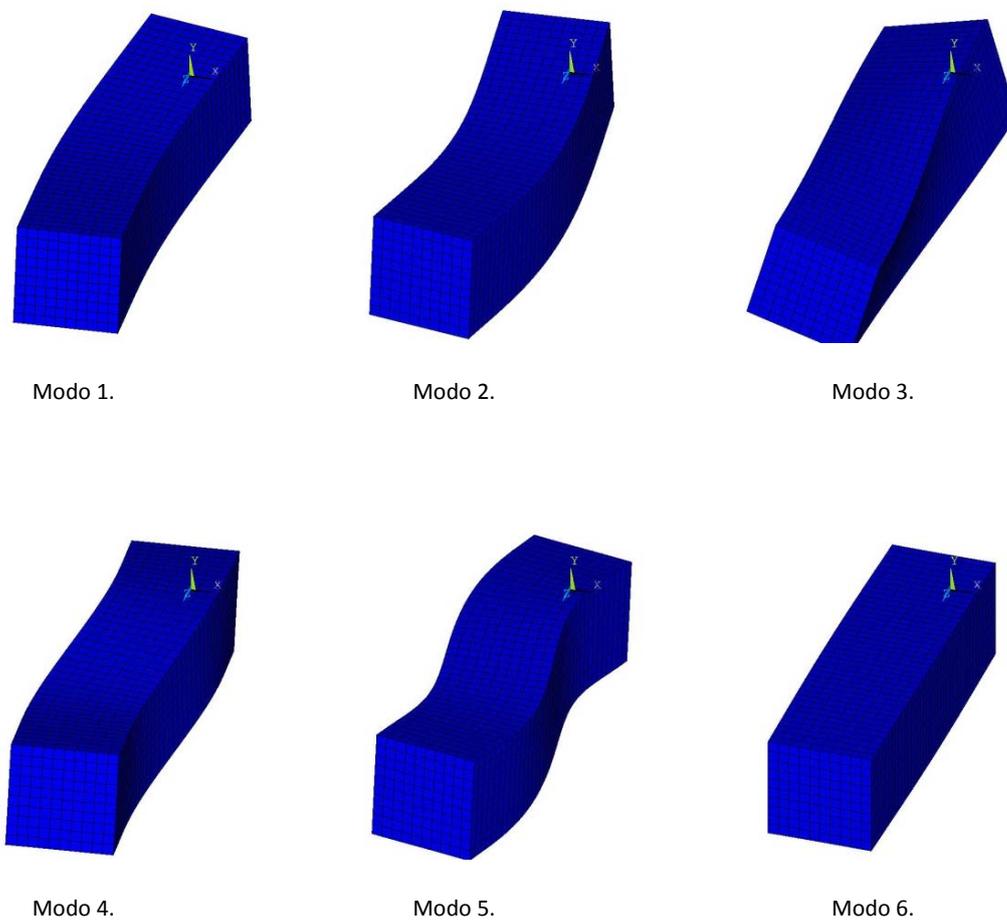


Fig. 2-18 Modos de vibración de la probeta de formato normalizado 40 x 40 x 160 mm.

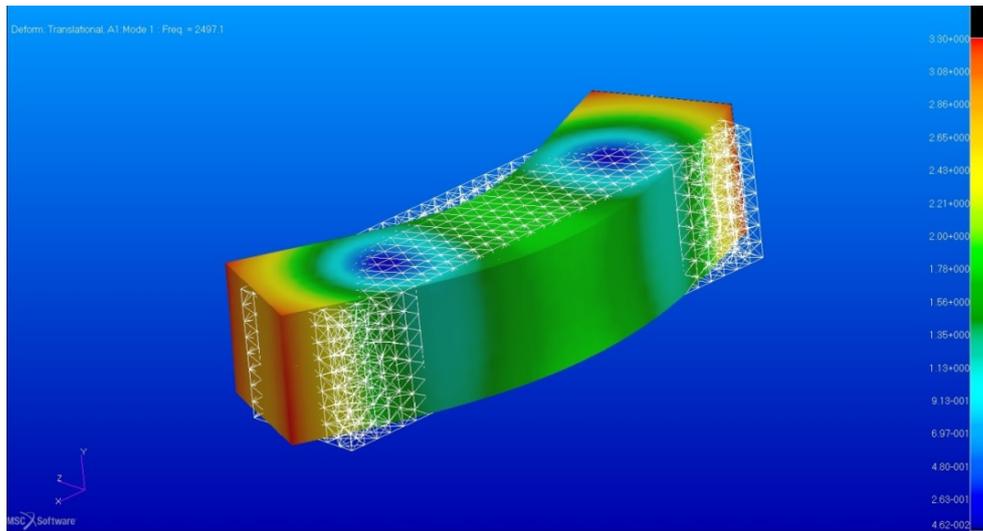


Fig. 2-19 "Modo de Vibración 1 = Flexión 1".

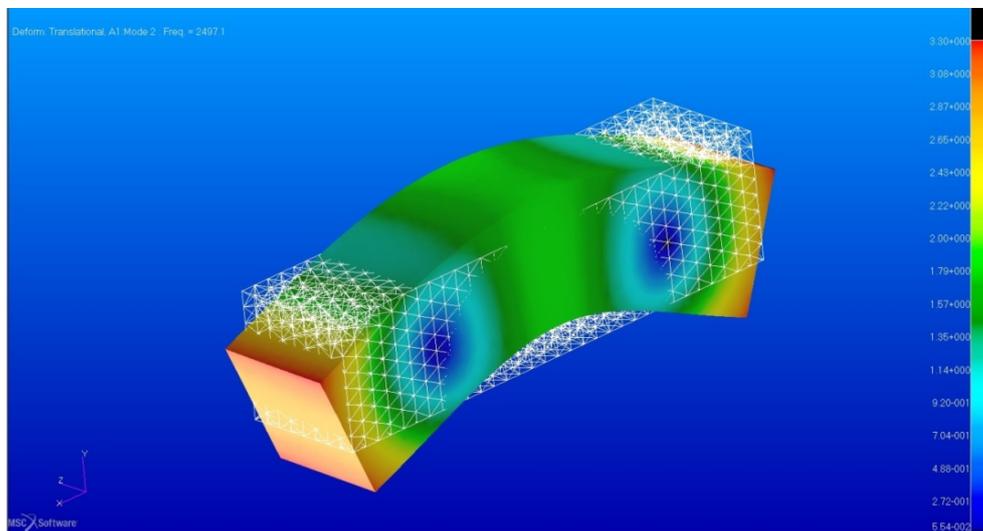


Fig. 2-20 "Modo de Vibración 2 = Flexión 2".

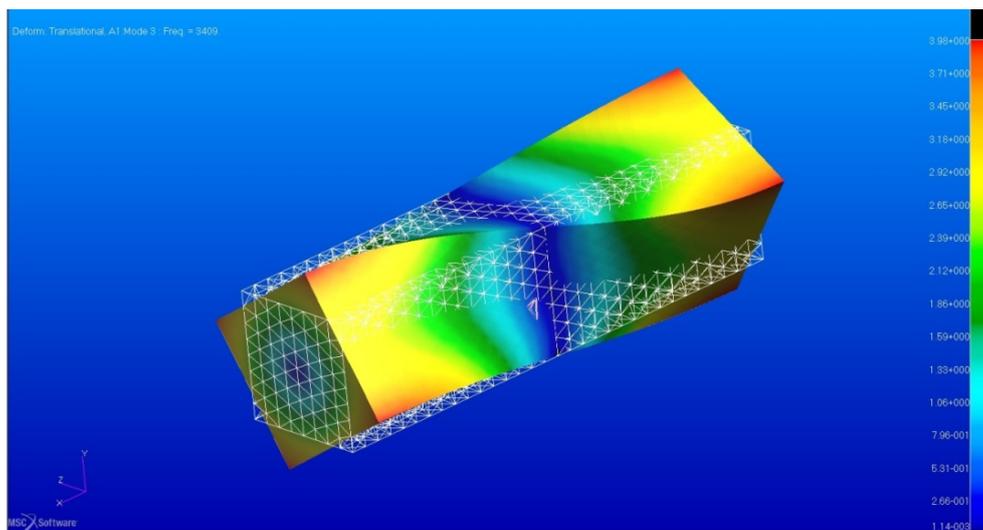


Fig. 2-21 "Modo de Vibración 3 = Torsión".

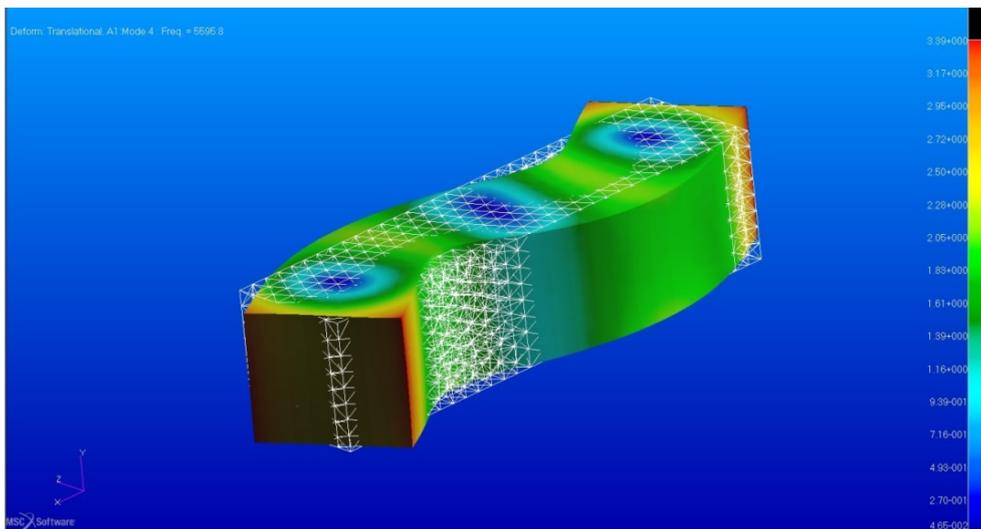


Fig. 2-22 "Modo de Vibración 4 = Doble Flexión 1".

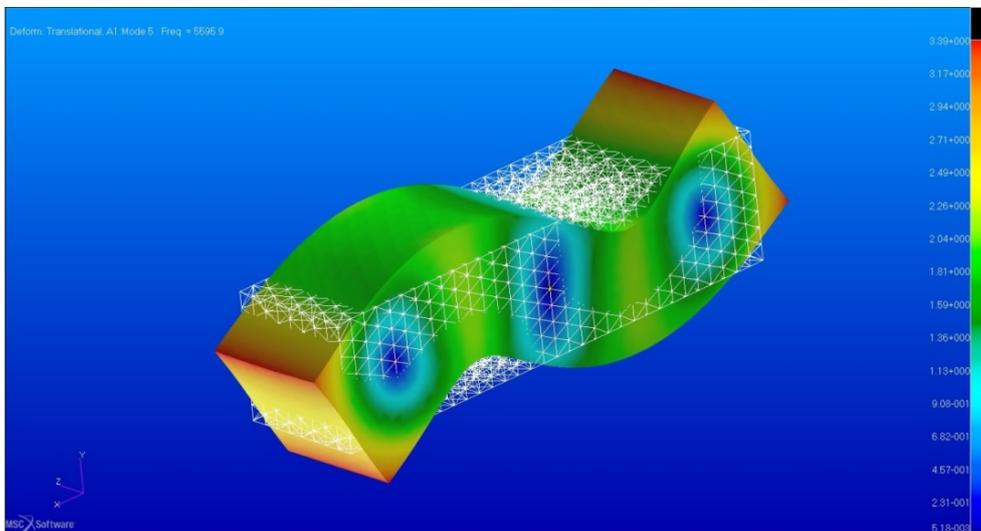


Fig. 2-23 "Modo de Vibración 5 = Doble Flexión 2".

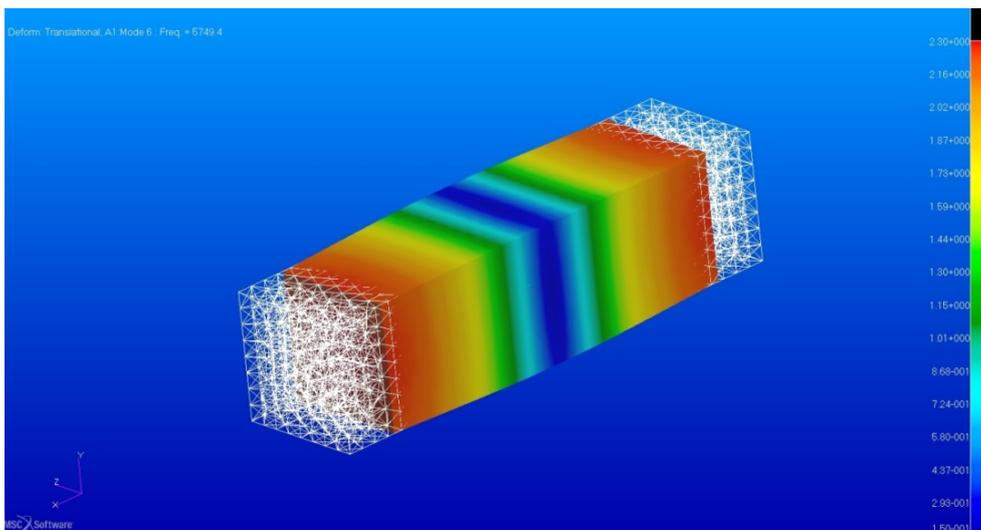


Fig. 2-24 "Modo de Vibración 6 = Axil (longitudinal)".

2.4.6.2. Probetas prismáticas delgadas de 20 x 40 x 160 mm.

Si se simula la probeta prismática de 20 x 40 x 160 mm mediante el programa de elementos finitos se obtienen los valores de la frecuencia natural para los modos de vibración indicados en la Tabla 2–28.

En este caso y en el siguiente, ambos con secciones de probeta rectangulares, se obtienen diferentes frecuencias para los dos primeros modos de flexión, que se corresponden cada uno de ellos con las distintas dimensiones de la sección rectangular. El modo 1 de flexión se relaciona con la posición de la probeta que cuenta con la inercia menor y, por tanto, al modo 2 le corresponde la posición con inercia mayor.

Además, aunque los dos primeros modos de flexión y el de torsión se mantienen en este orden, aparece un modo 5 de doble torsión provocando que en esta ocasión la excitación del modo de vibración a compresión coincida con el modo de vibración 7.

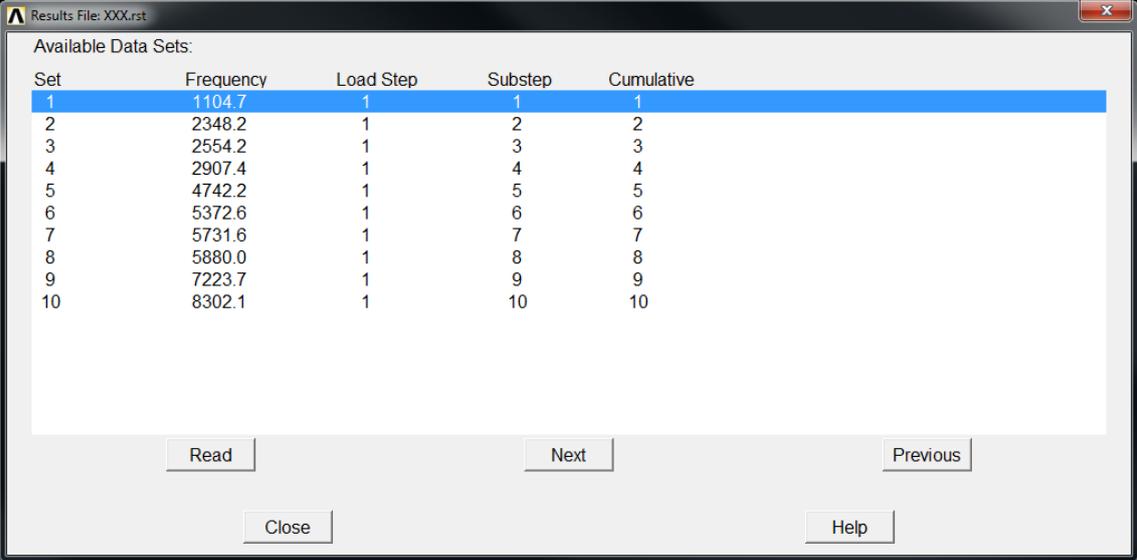
Set	Frequency	Load Step	Substep	Cumulative
1	1440.7	1	1	1
2	2554.2	1	2	2
3	2825.8	1	3	3
4	3677.4	1	4	4
5	5666.4	1	5	5
6	5731.4	1	6	6
7	5879.3	1	7	7
8	6584.3	1	8	8
9	8539.2	1	9	9
10	9284.6	1	10	10

Tabla 2–28 Modos de vibración y frecuencias naturales para probetas de 20 x 40 x 160 mm.

2.4.6.3. Probetas prismáticas delgadas de 15 x 40 x 160 mm:

Si de nuevo con el programa de elementos finitos se simula la probeta prismática de 15 x 40 x 160 mm, se obtienen los valores de la frecuencia natural para los modos de vibración referidos anteriormente indicados en la Tabla 2–29.

En esta ocasión hay un intercambio de posiciones entre las frecuencias de resonancia de flexión, relacionada con la posición de la probeta que cuenta con la inercia mayor, y de torsión, correspondiendo a la primera el modo 2, mientras que la segunda se excita en el modo 3. Además aparece un modo 6 de triple flexión, con lo que la frecuencia de resonancia longitudinal o de axil pasa al modo 8.



Set	Frequency	Load Step	Substep	Cumulative
1	1104.7	1	1	1
2	2348.2	1	2	2
3	2554.2	1	3	3
4	2907.4	1	4	4
5	4742.2	1	5	5
6	5372.6	1	6	6
7	5731.6	1	7	7
8	5880.0	1	8	8
9	7223.7	1	9	9
10	8302.1	1	10	10

Tabla 2–29 Modos de vibración y frecuencias naturales para probetas de 15 x 40 x 160 mm.

Comparando las tres tablas, se observan coincidencias en la frecuencia de vibración natural de flexión con valores de 2.554 Hz cuando la probeta está apoyada en la posición que cuenta con mayor inercia.

También se dan valores muy similares en la frecuencia de resonancia longitudinal o de axil para los tres formatos de probetas, aproximadamente 5.880 Hz, independientemente del ancho elegido.

Todas estas similitudes observadas nos van a servir para interpretar los resultados en función de la variación de los espesores de las probetas respecto del formato normalizado 40 x 40 x 160 mm.

2.5. Tabla resumen de las características del mortero.

En la Tabla 2–30 se presentan las características, a modo de resumen final, de este mortero “ONEXIT Universal” sobre el que hemos realizado los ensayos anteriormente expuestos tanto en fresco como endurecido a los 28 días.

Aparecen, por un lado, los valores obtenidos de nuestros ensayos y, en otra columna, los valores del Documento de Idoneidad Técnica Nº 543p/09 (DIT).

Característica	Norma	Unidades	Ensayo	DIT
Mortero fresco (24% agua)				
Retención de agua	UNE 83-815:93	%	99	96
Consistencia	UNE-EN 1015-3	mm	133	148
Densidad aparente	UNE-EN 1015-6	kg/m ³	1.726	1.733
Contenido en aire	UNE-EN 1015-7	%	15	–
Mortero endurecido (24% agua y 28 días)				
Resistencia a flexotracción	UNE-EN 1015-11	MPa	2,7	2,0
Resistencia a compresión	UNE-EN 1015-11	MPa	7,4	7,5
Densidad aparente en seco	UNE-EN 1015-10	kg/m ³	1.460	1.512
Retracción de secado	UNE 80112	mm/m	-0,92	-0,90

Tabla 2–30 Resumen de resultados de ensayos.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se puede concluir que el mortero “ONEXIT Universal” cumple con las prestaciones declaradas voluntariamente por el fabricante (DIT_plus:543p/09, 2009). Queda pendiente la determinación del módulo de deformación dinámico que se desarrolla en los siguientes capítulos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DIT_plus:543p/09. (2009). Documento de Idoneidad Técnica plus: N.º 543p/09. Morteo monocapa para revestimiento de fachadas ONEXIT MONOCAPA UNIVERSAL. *Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja*.
- UNE-EN_196-1. (2005). Método de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas. *AENOR*.
- UNE-EN_197-1. (2011). Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes. *AENOR*.
- UNE-EN_998-1. (2010). Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: morteros para revoco y enlucido. *AENOR*.
- UNE-EN_1015-2. (1999). Método de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 2: Toma de muestras total de morteros y preparación de los morteros para ensayo. *AENOR*.
- UNE-EN_1015-3. (2003). Método de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas). *AENOR*.
- UNE-EN_1015-6. (1999). Método de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco. *AENOR*.
- UNE-EN_1015-7. (1999). Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 7: Determinación del contenido en aire en el mortero fresco. *AENOR*.
- UNE-EN_1015-10. (2000). Método de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido. *AENOR*.
- UNE-EN_1015-11. (2000). Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido. *AENOR*.
- UNE_80112-EX. (1989). Métodos de ensayo de cementos. Ensayos físicos. Determinación de la retracción de secado y del hinchamiento en agua. *AENOR*.
- UNE_80305. (2012). Cementos blancos. *AENOR*.
- UNE_83816-EX. (1993). Morteros. MÉTODOS DE ENSAYO. Morteros frescos. Determinación de la capacidad de retención de agua. *AENOR*.

Adaptación a morteros de ensayos normalizados.

3.1. INTRODUCCIÓN.....	97
3.2. DETERMINACIÓN DE MÓDULOS ESTÁTICOS, E_s	98
3.2.1. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO BAJO COMPRESIÓN.	98
3.2.2. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO A PARTIR DEL ENSAYO DE FLEXOTRACCIÓN	102
3.3. DETERMINACIÓN DE MÓDULOS DINÁMICOS.	104
3.3.1. PROCEDIMIENTO GENERAL.....	104
3.3.2. MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO LONGITUDINAL.	108
3.3.3. MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO DE FLEXIÓN.	111
3.3.4. MÓDULO DE DEFORMACIÓN TRANSVERSAL DINÁMICO (G) DE TORSIÓN.	119
3.3.5. COEFICIENTE DE POISSON, ν	121
3.3.6. RESULTADOS PRELIMINARES.....	122
3.4. PLAN DE ENSAYOS.....	125

En este capítulo se describen los procedimientos de ensayo a los que se ha sometido al mortero fuera del campo estrictamente normalizado, bien porque se adapta la normativa para otro material, caso común de los módulos elásticos dinámicos, o bien porque la edad de la probeta o sus dimensiones no son coincidentes con las existentes para morteros.

3.1. Introducción.

En el caso que nos ocupa, de un mortero específico para revestimiento, resulta esencial poder obtener resultados de sus características mecánicas puesto en obra, donde su espesor y el tiempo de curado difieren de las dimensiones y edades marcadas por la familia de normas de referencia para morteros, la UNE-EN 1015.

Además se precisa de la utilización de ensayos no destructivos que permita conocer la evolución en el tiempo de las propiedades elásticas del material dentro de una misma muestra.

Para ello, los métodos que se han seguido han sido:

1. Determinación de las propiedades elásticas a partir de las frecuencias de resonancia fundamentales siguiendo el esquema de ensayos propuesto por la norma americana específica para hormigón (ASTM-C215, 2008).
2. Determinación del Módulo de Elasticidad Estático bajo compresión adaptando la norma propia de hormigones (UNE-EN_1352, 1997) a probetas de mortero.
3. Determinación del Módulo de Elasticidad Estático a flexotracción y, en algunos casos, también a flexocompresión a partir del ensayo de flexión estática que se ha explicado en el capítulo anterior (UNE-EN_1015-11, 2000). Durante el ensayo las probetas disponen, para medir la deformación, de las mismas dos galgas o bandas en las caras superior (compresión) e inferior (tracción) provenientes del ensayo estático bajo compresión. Así, con la lectura de estas galgas y con la de la célula de carga, se puede obtener la gráfica tensión-deformación del material. La pendiente de la recta de regresión de la zona lineal del gráfico será el módulo de elasticidad.
4. Siguiendo con el procedimiento anterior, determinación de la resistencia a flexión a partir de la carga de rotura y cálculo de la resistencia a compresión a partir de los dos semiprismas resultantes del ensayo a flexión.

Los dos primeros métodos son ensayos no destructivos por lo que las probetas se pueden usar para realizar más ensayos en el tiempo o para realizar los ensayos destructivos de resistencia mecánica de flexotracción y compresión uniaxial que figuran como tercer y cuarto métodos.

Los resultados, tanto para el módulo de elasticidad dinámico como para el estático, se obtienen bajo presunciones necesariamente simplificadas, dado que las expresiones utilizadas en los cálculos de módulo de Young son válidas en medios isótropos y homogéneos, cosa que no es estrictamente cierta en el caso de los morteros.

La determinación del módulo de elasticidad por todos estos métodos se va a realizar sobre probetas RILEM normalizadas de 40 x 40 x 160 mm. Ya se explicará en el plan de ensayos, pero lo adelantamos aquí también, que se van a usar otro tipo de probetas de la misma anchura y largura que las normalizadas pero de espesores 15 mm y 20 mm con la idea de comprobar cómo influye el tamaño de la probeta en los resultados y correlacionarlo con muestras obtenidas *in situ*.

Estos formatos más estrechos no se van a ensayar ni por el segundo ni por el último método, dado el formato reducido de las probetas y la falta de expresiones para compararlos con los normalizados.

3.2. Determinación de módulos estáticos, E_s .

Se describen a continuación los dos procedimientos de ensayo mencionados para determinar el módulo de deformación estático del mortero, $E_{m,s}$.

3.2.1. Determinación del Módulo de Elasticidad Estático bajo Compresión.

Se ha planteado obtenerlo adaptando la norma para la determinación del módulo de elasticidad estático bajo compresión en hormigones (UNE-EN_1352, 1997) a las probetas de mortero, siguiendo el ejemplo de otros trabajos (Toma, Covatariu, Toma, Taranu, & Budescu, 2013), puesto que no existe norma específica al respecto. Se trata, por tanto, de un ensayo no normalizado, y su fin es tener un valor de referencia a la hora de determinar el módulo de elasticidad dinámico.

Esta norma calcula el módulo de elasticidad estático (E_s) a partir de la diferencia entre las deformaciones longitudinales correspondientes al aumento de la tensión de compresión desde la tensión de ensayo inicial σ_a (aproximadamente igual a un 5% de la resistencia declarada a compresión del mortero que ha sido determinada en el capítulo anterior) a la tensión de ensayo máxima σ_b (generalmente igual a un tercio, 33%, de la resistencia declarada a compresión del material).

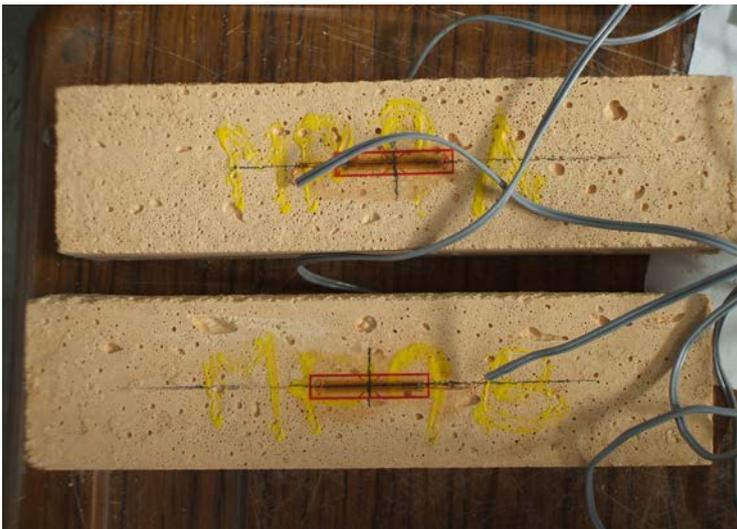


Fig. 3–1 Galgas instrumentadas en las probetas.



Fig. 3–2 Posición durante el ensayo.

Para determinar las deformaciones longitudinales de compresión se han usado dos galgas o bandas extensiométricas en cada probeta (Fig. 3-1).

Estas galgas se han adherido sobre dos de las superficies longitudinales opuestas de la probeta (Fig. 3-2), coincidentes con caras enmoldadas para evitar posibles errores en la medida.

El equipo de ensayo utilizado (Fig. 3-3) está compuesto por la prensa (SUZPECAR 10 t) de hasta 100 kN de carga máxima, el módulo de amplificación y adquisición de datos (HBM QuantumX 1615B) de hasta 16 canales para puente extensiométrico en configuración de galgas en cuarto, medio y puente completo, ordenador para el registro y visualización de los datos, y software para el tratamiento de la señal (catmanEasy-AP).

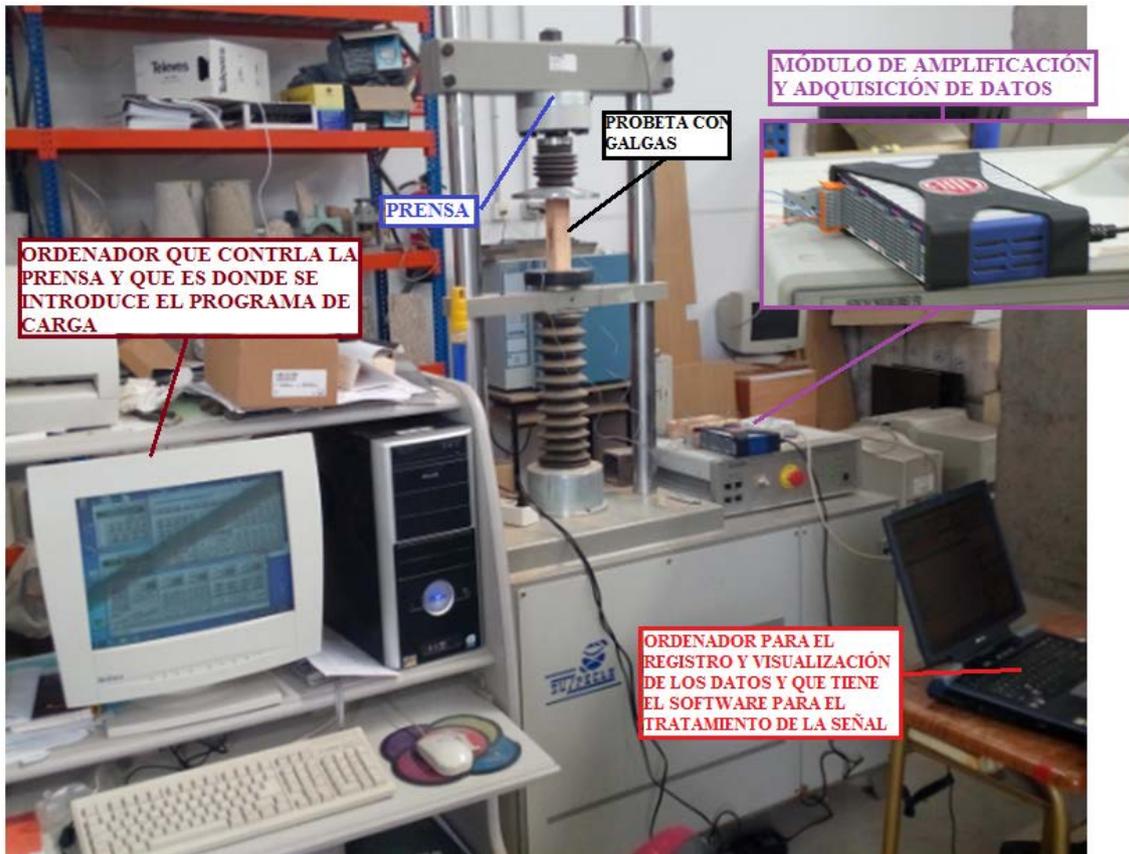


Fig. 3-3 Equipo para el ensayo de determinación del módulo de elasticidad estático bajo compresión.

Se ha considerado como resistencia a compresión declarada del mortero 7,50 MPa obtenida en la caracterización del material, lo que implica una carga de rotura de aproximadamente 12 kN, para las probetas normalizadas de 40 x 40 x 160 mm. El valor de la carga utilizada para la tensión inicial del ensayo (5%) ha sido de 0,6 kN, mientras que la tensión máxima del ensayo (33%) se ha fijado en 4,0 kN, acorde con la norma.

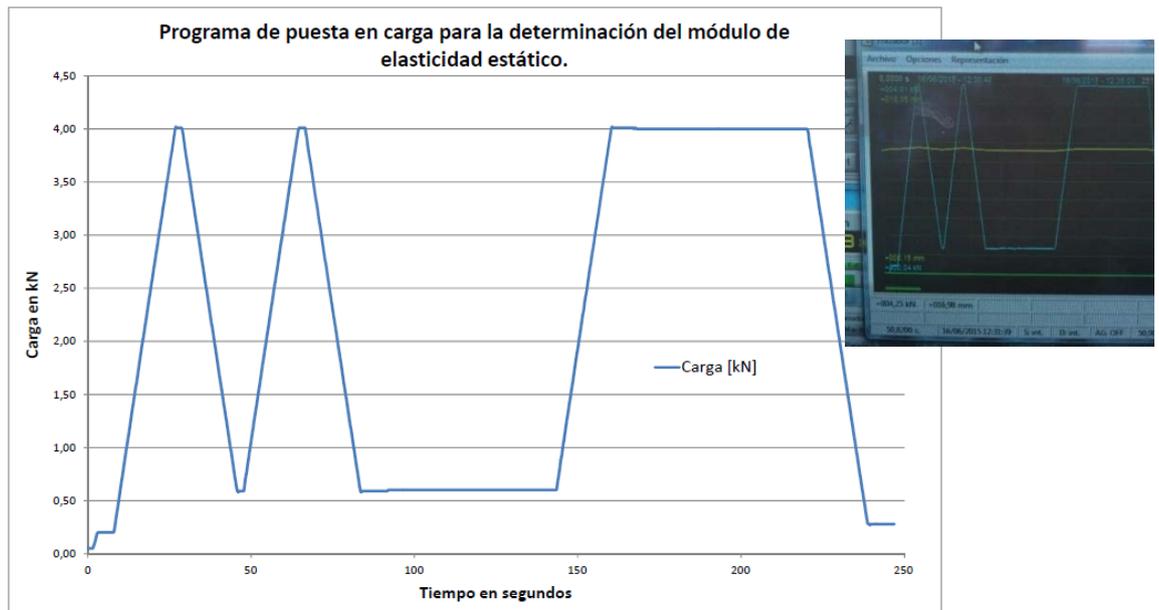
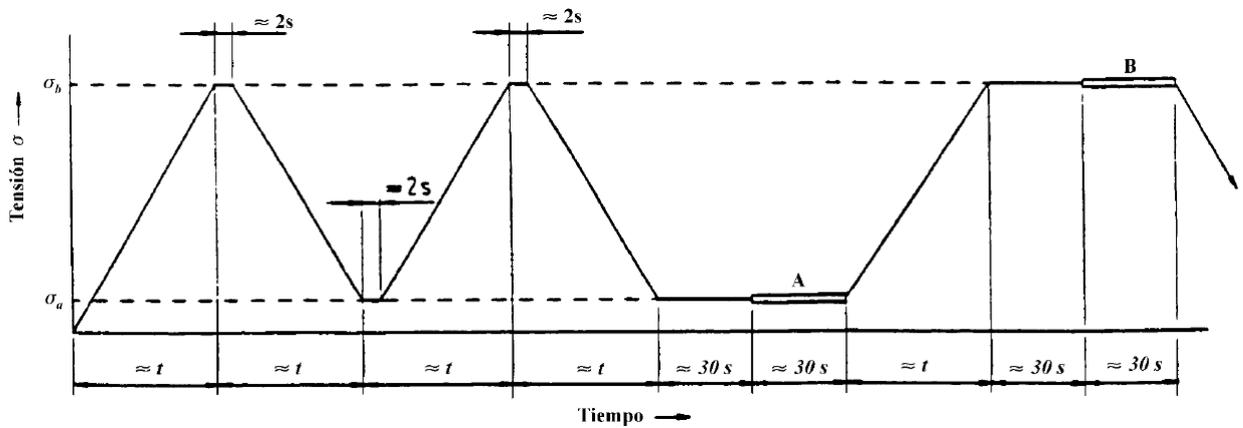


Fig. 3-4 Programa de puesta en carga para la determinación del módulo de elasticidad estática.

El programa de puesta en carga para la determinación del módulo de elasticidad estática, se indica en la Fig. 3-4 según las especificaciones establecidas en la norma UNE-EN 1352 (Fig. 3-5).



A lectura y registro de la tensión de ensayo inicial σ_a y de la deformación correspondiente ϵ_a ;

B lectura y registro de la tensión de ensayo máxima σ_b y de la deformación correspondiente ϵ_b ;

t tiempo de carga y de descarga, conforme a EN 679 o a EN 1354.

Fig. 3-5 Programa tipo de puesta en carga para el módulo de elasticidad estática según UNE-EN 1352.

En la Fig. 3-6 se visualiza la medida de las galgas en tiempo real, así como el valor medio de las mismas y los límites del 40%. Si la deformación de la galga difiere más del 40% de su valor medio, la probeta debe ser recentrada y el ensayo repetirse.



Fig. 3-6 Visualización y registro de los datos de las galgas en el ensayo estático de compresión.

El módulo de elasticidad se calcula a partir de la ecuación:

$$E_{m,s} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a}$$

donde,

$E_{m,s}$ es el módulo de elasticidad del mortero, en $\text{N/mm}^2 \equiv \text{MPa}$;

σ_b es la tensión de ensayo máxima antes del último ciclo de carga, $\text{N/mm}^2 \equiv \text{MPa}$;

σ_a es la tensión de ensayo inicial antes del último ciclo de carga, $\text{N/mm}^2 \equiv \text{MPa}$;

ε_b es la deformación media correspondiente a la tensión de ensayo máxima σ_b ;

ε_a es la deformación media correspondiente a la tensión de ensayo inicial σ_a ;

y donde ε_a y ε_b son medidos directamente como se muestra en la Fig. 3-5.

Que en función de la carga aplicada y las dimensiones de las probetas de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ queda,

$$E_{s_c} [\text{MPa}] = \frac{Q_{33\%} - Q_{5\%}}{b \cdot t} = \frac{(4 \text{ kN} - 0,6 \text{ kN}) \cdot 10^3}{40 \text{ mm} \cdot 40 \text{ mm}} \cdot 10^{-6} = \frac{3400/1600 [\text{MPa}]}{\varepsilon_{33\%} - \varepsilon_{5\%}} \cdot 10^{-6}$$

donde,

$Q_{33\%}$ es la carga de ensayo máxima del último ciclo de carga, $Q_{33\%} = 4 \text{ kN}$;

$Q_{5\%}$ es la carga de ensayo inicial antes del último ciclo de carga, $Q_{5\%} = 0,6 \text{ kN}$;

ε_b es la deformación media correspondiente a la carga de ensayo máxima,

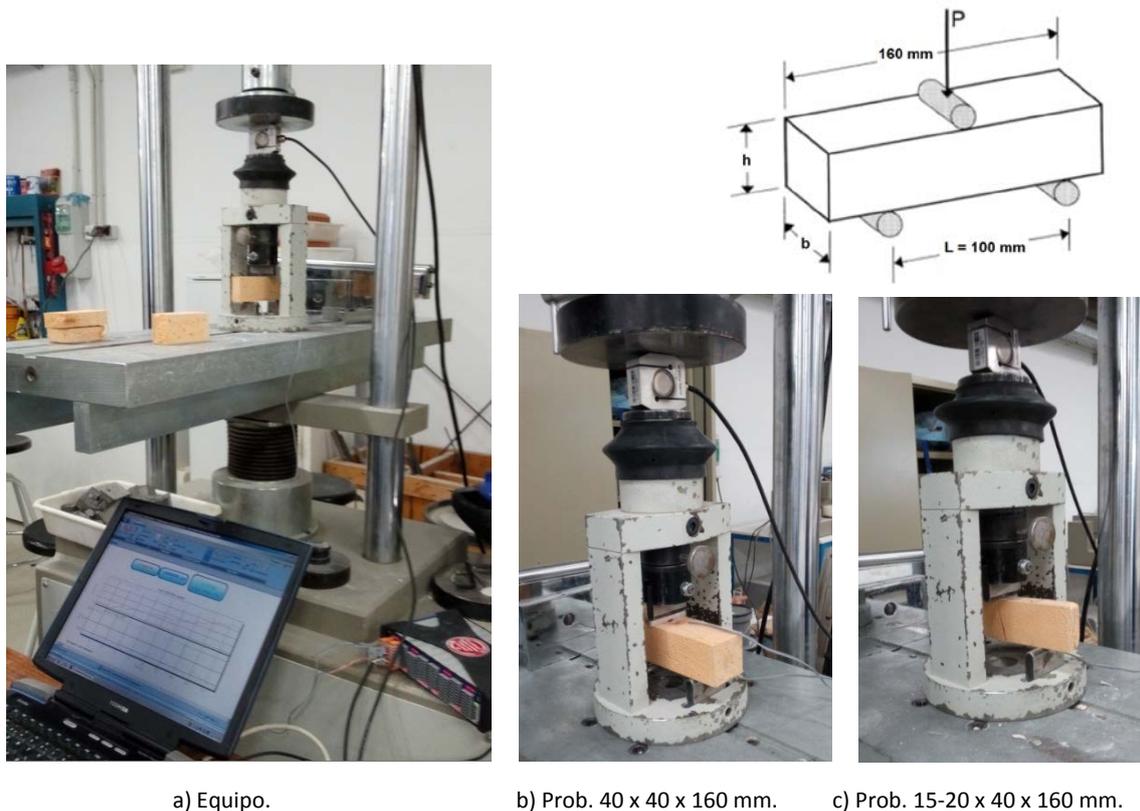
ε_a es la deformación media correspondiente a la carga de ensayo inicial,

3.2.2. Determinación del Módulo de Elasticidad Estático a partir del ensayo de flexotracción.

También se ha obtenido el módulo de elasticidad estático midiendo, mediante galgas extensiométricas (Rosell & Cantalapedra, 2011), la deformación que va sufriendo la probeta durante el ensayo de flexotracción que se describió en el capítulo anterior (UNE-EN_1015-11, 2000).

El procedimiento del ensayo es el clásico de flexión en tres puntos usado para la determinación de la resistencia, la única diferencia estriba en la instrumentación de las probetas que mantienen las dos bandas del ensayo para el cálculo de $E_{m,s}$ bajo compresión anterior explicado.

Lógicamente la probeta se ha de situar de modo que ambas galgas tomen valores de deformación de la cara traccionada y de la comprimida. Además, para poder obtener datos continuos de tensión y deformación es necesario añadir una célula de carga conectada también a la cadena de medida, Fig. 3–7.



a) Equipo.

b) Prob. 40 x 40 x 160 mm.

c) Prob. 15-20 x 40 x 160 mm.

Fig. 3–7 Ensayo de determinación del módulo de elasticidad estático a flexión.

El mismo software, CatmanEasy v.3.5.1.48, de tratamiento de la señal que se ha usado en el ensayo anterior va midiendo instantáneamente la carga que se va aplicando a la probeta y las deformaciones a las que están sometidas las galgas. El programa va mostrando una gráfica de los resultados de la carga y las deformaciones, Fig. 3–8, que quedan registradas a la par.

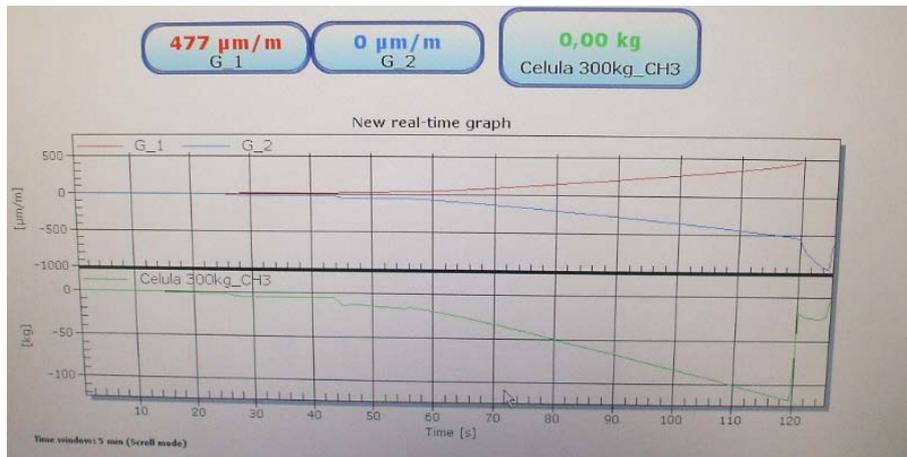


Fig. 3–8 Visualización y registro de los datos de las galgas en el ensayo estático a flexión.

El software permite guardar los valores de carga y deformación y analizarlos a través de un módulo específico para limpiar la parte de resultados previos a la puesta en carga de la probeta y posteriores a su rotura (Fig. 3–9). Se ha elegido un rango de 5 pares de valores carga-deformación por segundo que finalmente se han exportado a un formato de hoja de cálculo.

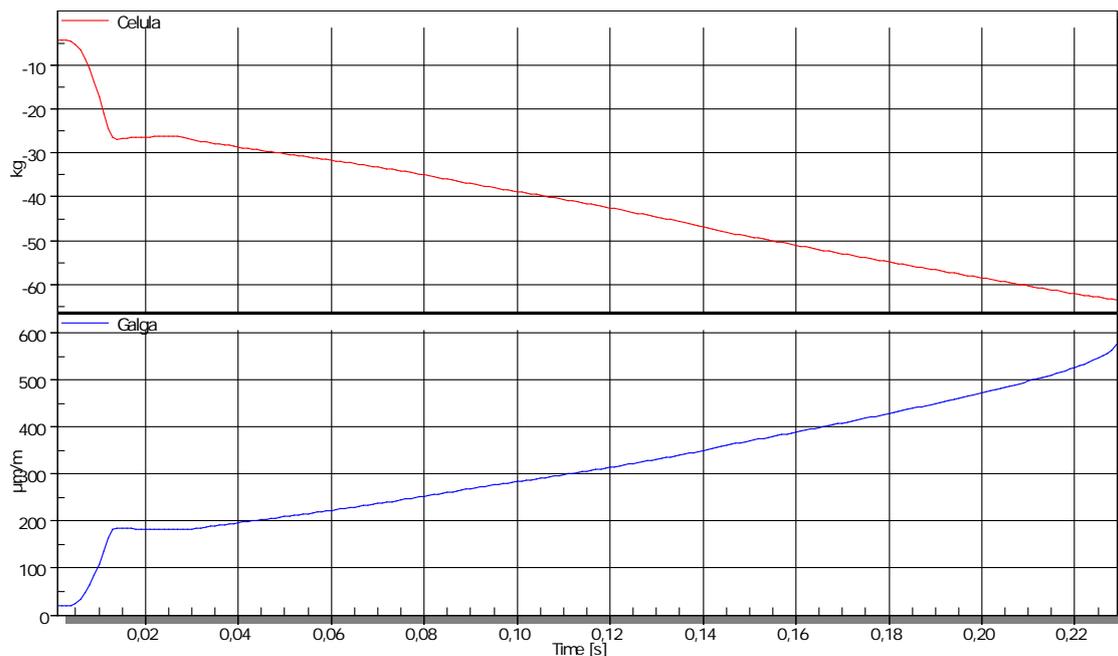


Fig. 3–9 Gráficas de carga y deformación a lo largo del ensayo.

Entonces basta con transformar la carga puntal aplicada por la prensa en tensión para poder dibujar la clásica gráfica tensión-deformación. Par determinar el módulo elástico estático basta con calcular la pendiente de la recta que más se aproxime a dicha curva en la zona elástica.

En principio, el más interesante para nuestros propósitos es el módulo de elasticidad de tracción, porque es la sollicitación a la que el mortero puede estar sometido cuando se fisura.

3.3. Determinación de módulos dinámicos.

Para algunos materiales específicos, como el hormigón, la piedra natural y los productos refractarios, existen normas para determinar su módulo de Young dinámico (MOE) a partir de la aplicación de técnicas de análisis de su frecuencia de resonancia. Sin embargo, en el campo de los morteros no hay normativa específica para calcular dicho módulo de elasticidad dinámico, de hecho no hay normativa para calcular ningún módulo de elasticidad en morteros, por lo tanto se ha decidido seguir las especificaciones de la normativa americana para hormigón (ASTM-C215, 2008) adaptándola a nuestro objetivo con las probetas de 40 x 40 x 160 mm. Además, esta misma norma es la que usa el fabricante para sus ensayos.

El procedimiento que propone es similar al de las otras normas pero con la ventaja de disponer de un mayor número de trabajos referenciados (Deniz & Erdoğan, 2015; Haach, Carrazedo, Oliveira, & Corrêa, 2013; Kolluru, Popovics, & Shah, 2000; Lu, Sun, Feng, & Tian, 2013; Malaikah, Al-Saif, & Al-Zaid, 2004; Martínez-Molina et al., 2014; Nagy, 1997; Popovics, Zemajtis, & Shkolnik, 2008; Rosell & Cantalapiedra, 2011).

Los ensayos dinámicos aportan una calidad añadida a los resultados pues, al tratarse de ensayos no destructivos (END) (Jones, 1962), las probetas se pueden usar para conocer la evolución de sus propiedades en el tiempo o para realizar otro tipo de ensayos destructivos como los de resistencia mecánica de flexotracción y compresión. El método permite la medición de los cambios progresivos en la rigidez del mortero sin dañar la muestra, con la ventaja de disponer de un amplio rango de datos para su tratamiento estadístico aportando rigor y consistencia a los resultados, comparado con los métodos estáticos.

3.3.1. Procedimiento general¹.

El ensayo consiste en medir las frecuencias de resonancia fundamental tanto del modo de vibración longitudinal (tracción/compresión pura), como de los modos de vibración transversal o de flexión y de torsión. Para ello se aplica un impulso instantáneo (golpeo) sobre la probeta y se recoge la señal o espectro de frecuencias que este golpeo produce.

A partir de estas mediciones, conocidas la geometría y densidad de las probetas, es posible calcular, siguiendo la formulación expresada en la normativa, los módulos dinámicos de elasticidad para los modos de vibración fundamental transversal o de flexión (MOE_{flex}) y longitudinal (MOE_{long}), el módulo dinámico de deformación transversal (G) y la relación dinámica de Poisson (ν).

¹ La norma ASTM C215 establece dos métodos para el cálculo de la frecuencia de resonancia fundamental de cada modo de vibración: "Forced Resonance Method" e "Impact Resonance Method". El primero es muy parecido al método de ultrasonidos. En este trabajo se ha utilizado el de resonancia por impacto por lo que sólo se va a explicar lo referente a este.

3.3.1.1. Aparatos.

Para determinar la frecuencia de resonancia mediante impacto siguiendo los requerimientos de la norma se han utilizado los siguientes dispositivos:

- Un martillo de impacto modal instrumentado cuyo extremo golpeador tendrá forma semiesférica. En este caso se trata de un martillo de impacto Brüel & Kjaer 2302-5 (SN) que lleva incorporado una célula de carga, Fig. 3–10, aunque el uso de un martillo ordinario proporciona resultados comparables dado que el procedimiento requiere que se mida tan sólo la vibración de respuesta de la muestra.



Fig. 3–10 Martillo de impacto instrumentado.

- El transductor de vibración es el eslabón más crítico de la cadena de medición ya que, sin una señal de vibración adecuada, los resultados de un análisis posterior no serán fiables. El transductor más preciso es un acelerómetro piezoeléctrico con una frecuencia resonante de, al menos, dos veces la máxima frecuencia de operación. Se han utilizado dos acelerómetros, uno uniaxial 4519-003 de masa 1,5 g, rango de frecuencia de operación de 0,5 a 20.000 Hz y sensibilidad de 100 mV/g y otro triaxial² 4524B que cuenta con un preamplificador incorporado, tiene una sensibilidad, expresada en términos de tensión por unidad de aceleración, de 100 mV/g y un peso de 4,8 g. Ambos fabricados por Brüel & Kjaer con caja de titanio y núcleo cerámico, Fig. 3–11. Se acoplaron con cuidado a la muestra utilizando un adhesivo de unión rápida.



Fig. 3–11 Acelerómetros uniaxial (izq.) y triaxial (drcha.).

² Dado que se pretendía tomar mediciones de frecuencia de resonancia en varios modos se decidió usar un acelerómetro triaxial que permite medir la aceleración en una, dos o tres dimensiones, esto es, en tres direcciones del espacio ortonormales. De esta forma, con solo posicionarlo en una de las caras extremas fue posible obtener las frecuencias de resonancia en los modos longitudinal y transversal sin necesidad de cambiar su situación, simplemente modificando el punto del impacto.

- Un analizador digital de frecuencias al que van conectados el martillo y el acelerómetro. Este analizador consta de un amplificador de señal y un software que analiza la respuesta que le llega del transductor y la convierte en un espectro de frecuencias. En este caso se trata de un analizador dinámico de señal de Brüel & Kjaer Pulse C (SN) y el martillo y el acelerómetro van conectados a dos de sus cinco canales de entrada. El conversor analógico-digital es de 16 bits (Fig. 3–12).



Fig. 3–12 Analizador de frecuencia.

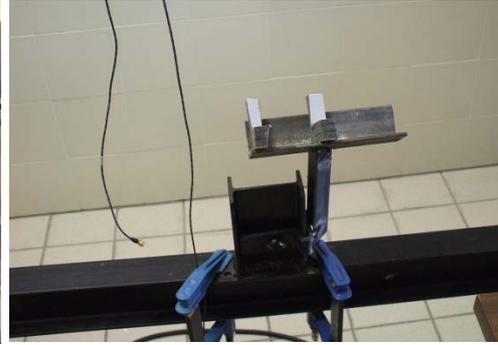


Fig. 3–13 Soportes.

- Los soportes ejercen una importante función, ya que aíslan las probetas de mortero de las vibraciones externas y pueden, si son rígidos y están situados en los nodos, definir el modo de vibración de las muestras. Aunque la norma sugiere utilizar este tipo de soportes pensamos que pueden añadir una no linealidad en la respuesta debido a la fricción con la muestra y por ello se ha preferido apoyar la probeta sobre unos tacos de espuma muy suave de 1,5 cm de espesor para permitir su libre vibración (Fig. 3–13). Esto ayuda significativamente en la consistencia de las mediciones.

En la Fig. 3–14 se presenta el esquema que aparece en la norma ASTM C215 del dispositivo para el ensayo por el método de resonancia por impacto.

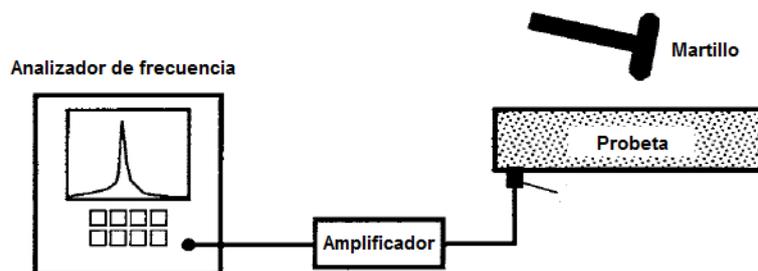


Fig. 3–14 Dispositivo para el ensayo por el método de resonancia por impacto.

Cabe destacar que antes de la ejecución de los ensayos se realizó una verificación de la cadena de medición. Se ha realizado un test de verificación con un calibrador de vibraciones Brüel & Kjaer 4294 para comprobar el estado del acelerómetro e indirectamente de la célula de carga del martillo.

3.3.1.2. Consideraciones previas al ensayo.

La norma ASTM C 215 solo exige estimar la frecuencia de resonancia en el autoespectro de la respuesta (aceleración que detecta el transductor) midiendo la frecuencia a la que se produce la resonancia.

Sin embargo, para asegurar la calidad de la medida se ha estimado también la FRF (función de respuesta en frecuencia) usando los estimadores H1 y H2 y obteniendo una medida de la magnitud de la FRF y la función de coherencia que permite marcar la calidad del ensayo (varía de 0 a 1 siendo 1 el mejor valor posible).

Los parámetros de procesado de señal de la cadena de medida se han fijado de acuerdo con el ya citado apartado 9 de la norma para recoger los espectros de frecuencia.

Dicho espectro se ha medido en una banda de 7 Hz (valor del filtrado de paso alto establecido, que elimina las frecuencias muy bajas, perturbadoras y ajenas al objetivo del ensayo) hasta los 12.800 Hz.

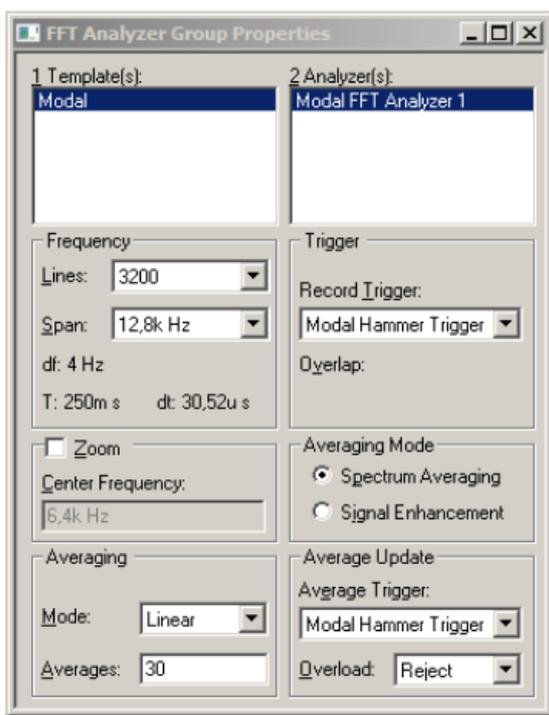


Fig. 3-15 Configuración del procesado de señal.

Se ha fijado una resolución de frecuencia de 3.200 líneas, lo que significa una separación entre líneas en frecuencia de 4 Hz. La longitud de tiempo de la ventana que se transforma en frecuencia es 250 ms y las muestras adquiridas en el tiempo están separadas $30,52 \times 10^{-6}$ s.

El número total de muestras adquiridas en cada transformación es de 8.191, mucho mayor de las 1.024 sugeridas como mínimo en norma, y la frecuencia de muestreo usada ha sido de 32.675 Hz, también mucho mayor que los 20.000 Hz sugeridos esta vez como mínimo (Fig. 3-15).

Por lo tanto los parámetros usados en la adquisición de datos superan con creces los mínimos exigidos y permite una resolución en frecuencia de 4 Hz, lo que supone una mejora sustancial en la precisión de la estimación del

módulo elástico llegando a una resolución de 10 MPa muy inferior a los límites marcados por la norma.

Para mejorar la estimación de las funciones obtenidas se han promediado linealmente 30 espectros en cada ensayo, conseguidos mediante 30 impactos. También se ha observado en cada impacto la función de coherencia y solo se admite si ésta ha mejorado.

3.3.2. Módulo de elasticidad dinámico longitudinal.

Se va a calcular el módulo de elasticidad dinámico longitudinal a partir de la frecuencia de vibración fundamental determinada por el método de resonancia por impacto de acuerdo con el apartado 9.2 de la norma (ASTM-C215, 2008). El procedimiento es el siguiente:

- Primeramente se determinan las dimensiones de la probeta, con un calibre digital, y su masa, mediante el uso de una báscula de precisión. En lo referente al tamaño de la probeta, la norma dice que existen limitaciones en cuanto a su relación dimensional, y aquellas que tengan relaciones entre la longitud y la dirección transversal máxima muy pequeñas o muy grandes, frecuentemente son difíciles de excitar. Los mejores resultados se obtienen cuando esta relación se encuentra entre 3 y 5.
- A continuación se pega adecuadamente el acelerómetro aproximadamente en el centro de una de las caras extremas como se muestra en la Fig. 3–16 y se coloca la probeta simplemente apoyada sobre una espuma suave de tal manera que puede vibrar libremente en el modo longitudinal.

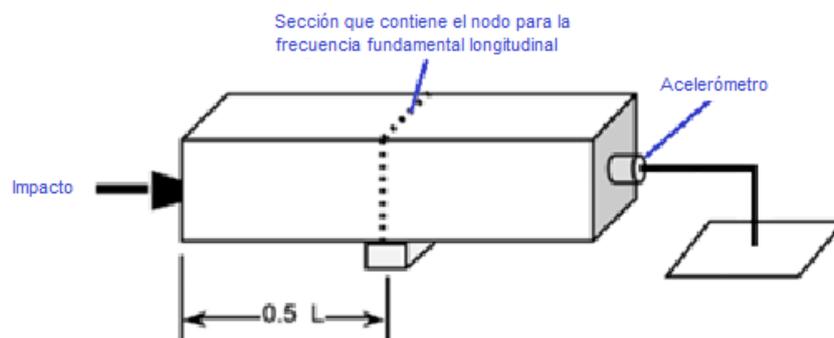


Fig. 3–16 Esquema de localización del golpeo y del acelerómetro para el modo longitudinal.

- Se prepara el analizador dinámico de señal para registrar la información de manera que la frecuencia de muestro sea al menos de 20.000 Hz y la longitud de registro de 1.024 puntos en cada transformación.
- Se golpea en la probeta usando el martillo (Fig. 3–17) de forma perpendicular y en el centro aproximado de la superficie extrema para aplicar la excitación que es medida por el transductor y enviada al analizador de frecuencia que dibuja el autoespectro de la respuesta (aceleración que detecta el acelerómetro) midiendo la frecuencia a la que se produce la resonancia. Esta será la frecuencia con el mayor pico de dicho espectro obtenido por la transformada rápida de Fourier (FFT) de la señal registrada del acelerómetro.
- Este procedimiento se debe realizar al menos tres veces, de manera que se registre la frecuencia resonante promedio.

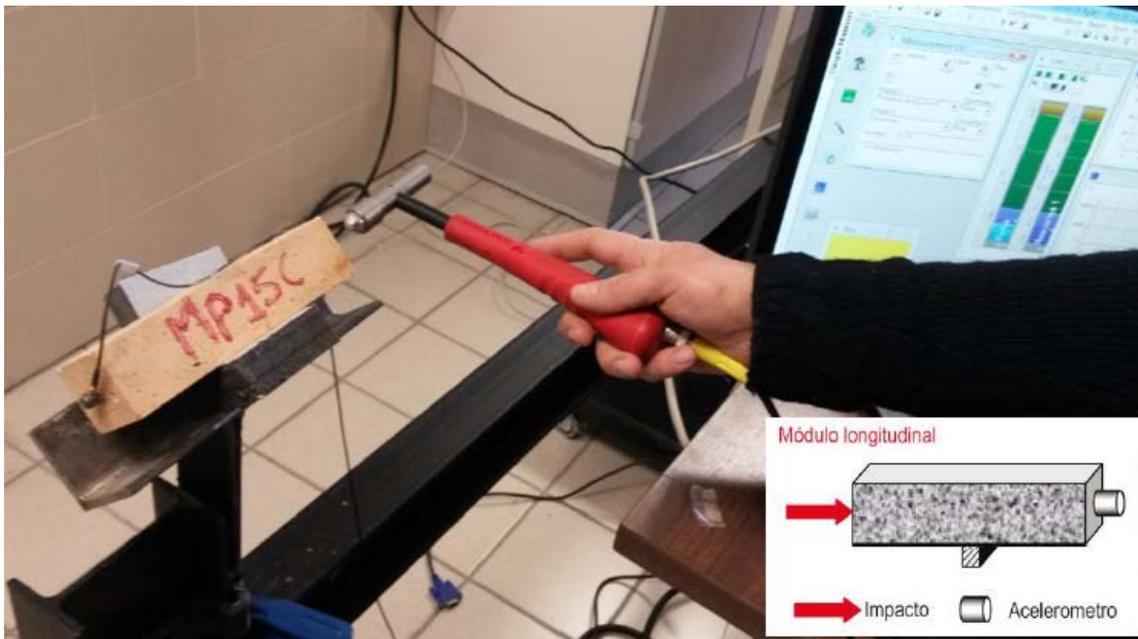


Fig. 3–17 Medición de la frecuencia de resonancia longitudinal con acelerómetro uniaxial.

En la Fig. 3–18 se pueden visualizar las gráficas (espectro de frecuencias proporcionado por el transductor, registro de la fuerza aplicada con el martillo y coherencia) de los resultados obtenidos para un ensayo realizado con un acelerómetro uniaxial.

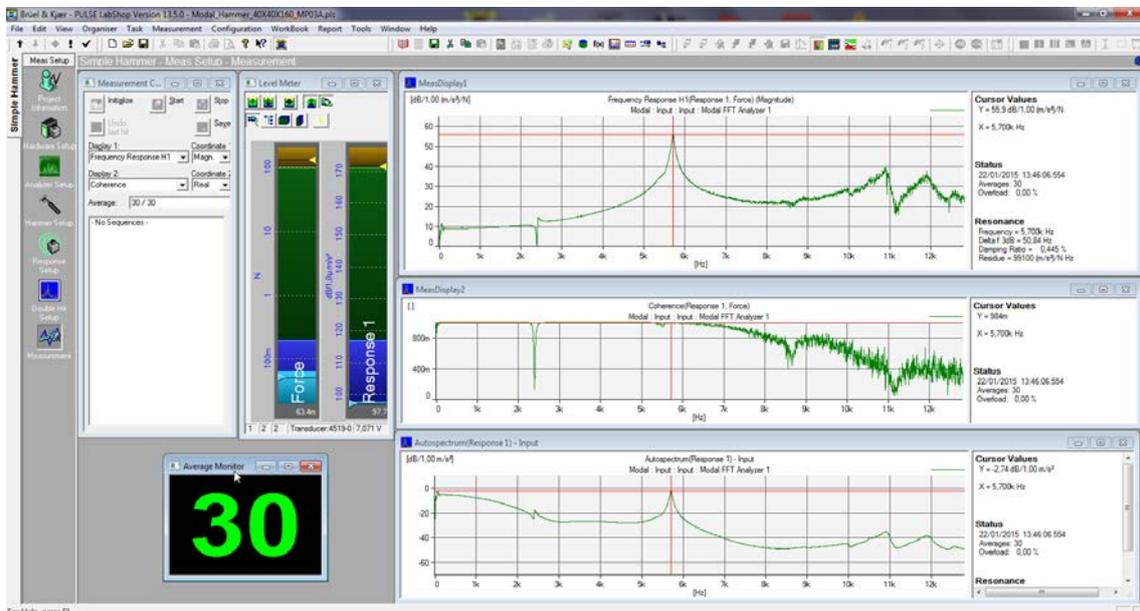


Fig. 3–18 Obtención de la frecuencia de vibración longitudinal con acelerómetro uniaxial.

En ellas vemos que el valor de la frecuencia de resonancia corresponde al valor de la coordenada del eje de abscisas del pico producido. También se puede observar que el valor de la coherencia es muy próximo a uno, lo que indica, como ya se explicó, una excelente calidad de las medidas del ensayo.

Finalmente se calcula el módulo de elasticidad dinámico con la formulación de la norma (ASTM-C215, 2008):

$$MOE_{long} \text{ [MPa]} = D \cdot M \cdot (n')^2 \cdot 10^{-6}$$

dónde:

D = coeficiente cuyo valor para probetas prismáticas se obtiene:

$$D = \frac{4 \cdot L}{b \cdot t}$$

siendo,

L la longitud, b el ancho y t el espesor de la probeta, medidos en metros.

M = la masa de la probeta en kg.

n' = la frecuencia longitudinal en Hz.

es decir,

$$MOE_{long} \text{ [MPa]} = 4 \cdot \frac{L}{b \cdot t} \cdot M \cdot (n')^2 \cdot 10^{-6}$$

La otra norma que facilita expresiones para el cálculo de las propiedades dinámicas de la piedra natural (UNE-EN_14146, 2004) establece en el apartado 8.2 que el módulo de elasticidad dinámico longitudinal, obtenido a partir de la frecuencia de resonancia fundamental en vibración longitudinal F_L para cualquier probeta viene dado por la siguiente ecuación:

$$Ed_L = 4 \cdot 10^{-6} \cdot L^2 \cdot \rho \cdot T \cdot (F_L)^2$$

siendo,

L la longitud de la probeta.

ρ la densidad aparente de la probeta.

T es un factor de corrección que depende de i (radio de giro de la sección de la probeta) y μ (coeficiente de Poisson) y que se calcula con la ecuación:

$$T = 1 + \frac{\pi^2 \cdot \mu^2 \cdot i^2}{L^2}$$

En el caso de las probetas estándar (probetas prismáticas de longitud $4b$ o cilíndricas de longitud $4d$ o $3d$) y si L viene expresada en metros, el valor de T se puede considerar que es igual a la unidad. Si L se expresa en metros, ρ en kg/m^3 y F_L en Hz, la expresión queda:

$$Ed_L[\text{MPa}] = 4 \cdot 10^{-6} \cdot L^2 \cdot \rho \cdot (F_L)^2$$

Se puede observar, con sólo operar un poco, que esta expresión es la misma que la dada por la norma de hormigón, pues teniendo en cuenta que la densidad aparente de una probeta prismática es:

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen prisma}} = \frac{M}{b \cdot t \cdot L}$$

la expresión de módulo quedaría:

$$Ed_L[\text{MPa}] = 4 \cdot 10^{-6} \cdot L^2 \cdot \frac{M}{b \cdot t \cdot L} \cdot (F_L)^2 = 4 \cdot \frac{L}{b \cdot t} \cdot M \cdot (F_L)^2 \cdot 10^{-6}$$

3.3.3. Módulo de elasticidad dinámico de flexión.

La frecuencia del modo de vibración a flexión, o transversal, se determina mediante la misma técnica de resonancia por impacto, pero esta vez de acuerdo al apartado 9.1 de la norma (ASTM-C215, 2008).

El aparataje y procedimiento es el mismo que ya se ha explicado, las únicas diferencias son la forma de apoyo de la probeta, la colocación del acelerómetro (si se realiza con el uniaxial) y el punto de golpeo.

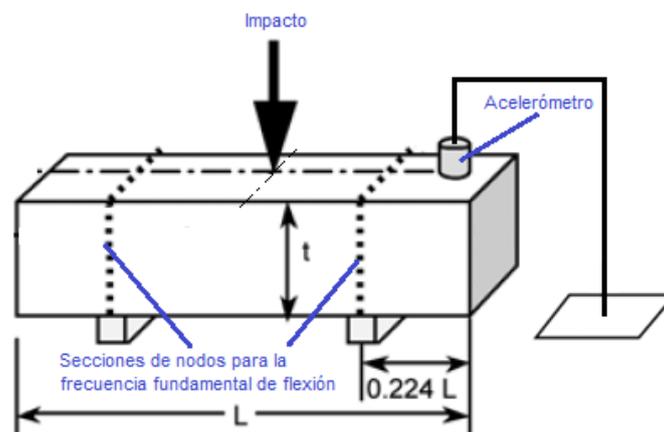


Fig. 3-19 Esquema de localización del golpeo y del acelerómetro para el modo de flexión.

Una vez apoyada la probeta para que pueda vibrar libremente en el modo transversal se realiza el golpeo con el martillo tomando como lugar para el impacto aproximadamente el punto central de una de las caras laterales de la probeta, en vez de la cara extrema, y de manera perpendicular a la superficie como se muestra en la Fig. 3-19.

Para el modo de vibración transversal, los puntos nodales están localizados a 0,224 veces la longitud de la probeta de cada extremo (aproximadamente a la cuarta parte). Las vibraciones hacen un máximo en los bordes de valor aproximado tres quintos del máximo en el centro y cero en los puntos nodales.

Como se hizo para determinar la frecuencia longitudinal, se registra mediante el software la frecuencia resonante que te da el analizador en el espectro de la respuesta, teniendo cuidado de que la coherencia salga cercana a uno para que la medida sea válida.



Fig. 3–20 Colocación del acelerómetro uniaxial y localización del golpeo para frecuencia de flexión.

En las Fig. 3–20 y Fig. 3–21 se muestra cómo se realizó el ensayo y cómo se obtienen los resultados del mismo para la probeta MP03. En la última se representa las gráficas obtenidas en el ensayo en la dirección transversal. En ellas, el pico que presenta mayor valor de amplitud del espectro de frecuencias corresponde a la dirección de respuesta coincidente con el impacto y el de menor valor corresponde a la respuesta ortogonal. Esto significa que el modo de vibración de flexión es un modo doble. Luego el valor de la frecuencia de los dos modos de vibración a flexión será el valor que marca el eje de abscisas de ambos picos. En el caso de probetas prismáticas de base cuadrada (probetas simétricas), la frecuencia para ambos modos tendrá valores muy próximos, no serán iguales debido a las pequeñas asimetrías de la probeta en su elaboración. La última gráfica corresponde a la coherencia que, como ya se ha dicho, conviene que sea cercana a uno para que sea de mayor calidad el valor obtenido.

Hay que mencionar que este ensayo se realizó con el acelerómetro uniaxial sólo para la probeta MP03 a modo de comprobación para ver que las frecuencias para este modo de vibración salían muy parecidas a las que se han calculado mediante simulación numérica por elementos finitos.

Ya hemos visto que en el modelo MEF los modos 1 y 2 se presentan con igual frecuencia y de valor 2.554 Hz. En el ensayo aparecen ambos modos a diferentes frecuencias muy próximas (2.392 Hz y 2.468 Hz) debido a las pequeñas asimetrías de la probeta en su elaboración. En cualquier caso vemos que estos valores se aproximan mucho a los obtenidos por simulación numérica.

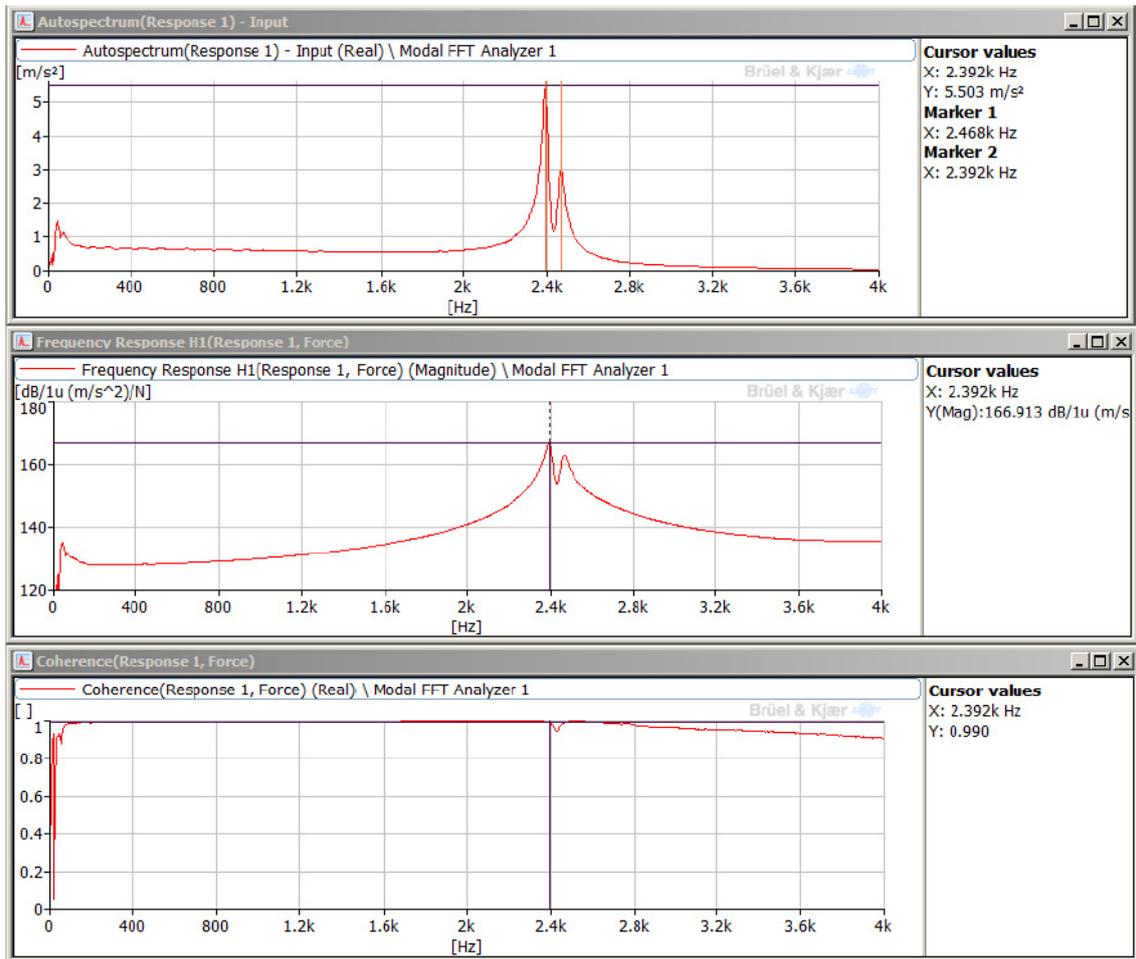


Fig. 3–21 Obtención de la frecuencia de vibración de flexión con acelerómetro uniaxial.

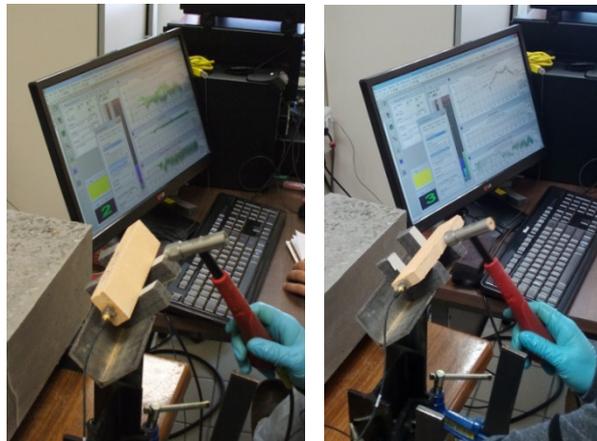
La medición de la frecuencia transversal o de flexión que se ha usado en el cálculo del módulo de elasticidad dinámico se ha realizado principalmente usando un acelerómetro triaxial, al igual que para la longitudinal, ya que con este tipo de transductor se pueden determinar ambas sin necesidad de moverlo de posición, lo que hace el ensayo mucho más rápido.

Tal y como hemos explicado y se puede ver en la Fig. 3–22, para determinar la frecuencia de resonancia en el modo de vibración transversal no hace falta mover el acelerómetro triaxial de la posición empleada para la determinación de la frecuencia en el modo longitudinal, es decir, sigue pegado en una de las bases de la probeta prismática o caras extremas. Ahora bien, en vez de golpear en la otra cara, la opuesta a donde se coloca el acelerómetro, que es lo que se hacía para determinar la frecuencia fundamental de vibración longitudinal, se golpea con el

martillo dos de las caras laterales de la probeta, por lo que el ensayo hay que hacerlo dos veces, una para cada cara, es decir, se coloca la probeta y se golpea en el centro de una de las caras hasta diez veces para que el analizador defina perfectamente el espectro y se anota la frecuencia.



a).- Probetas prismáticas de base cuadrada.



b).- Probetas prismáticas de base rectangular.

Fig. 3–22 Colocación del acelerómetro triaxial y localización del golpeo para frecuencia de flexión.

Esta frecuencia corresponde al primer pico de la gráfica, Fig. 3–23, de forma que el valor de la frecuencia de vibración a flexión será el valor que marca el eje de abscisas para ese pico. Esta es la frecuencia fundamental a flexión respecto de una de las caras (modo 1 de vibración a flexión).

Después lo que se hace es girar la probeta noventa grados respecto de su eje longitudinal y se realiza el mismo procedimiento golpeando aproximadamente en el centro pero de esta otra cara de la probeta prismática. La frecuencia obtenida ahora será la frecuencia fundamental a flexión respecto de otra de las caras (modo 2 de vibración a flexión).

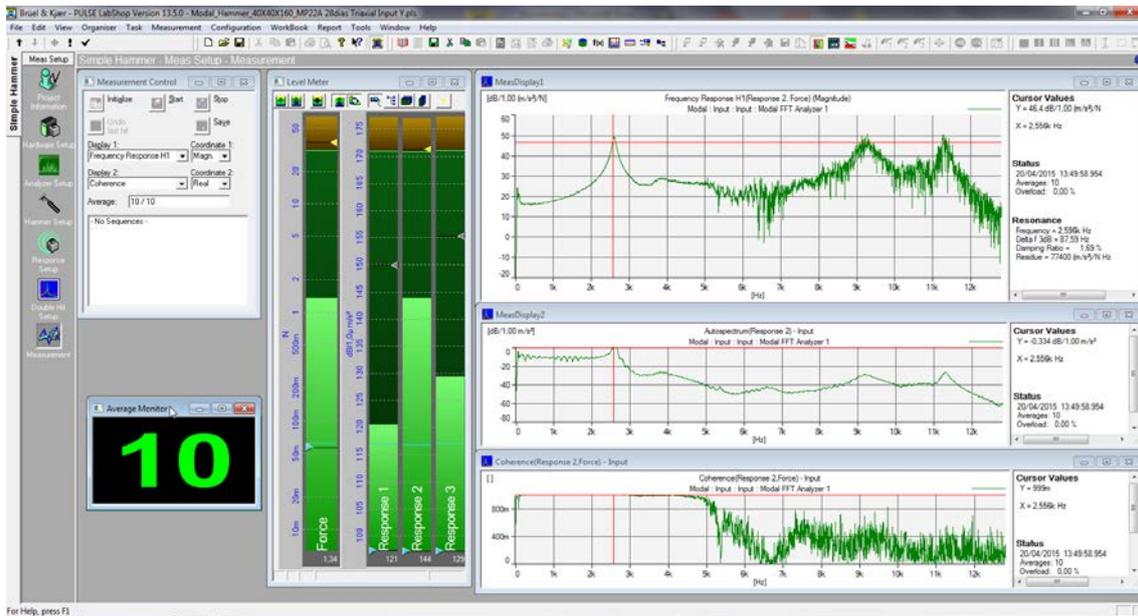


Fig. 3–23 Obtención de la frecuencia de vibración de flexión con acelerómetro triaxial.

A continuación se presenta el desarrollo matemático con el fin de calcular a partir de la frecuencia fundamental de vibración en flexión el módulo de deformación dinámico de acuerdo a cada una de las normas referenciadas, para comprobar la similitud de los resultados.

La norma (ASTM-C215, 2008) establece en el apartado 10.1 la siguiente expresión para determinar el Módulo de Elasticidad Dinámico a partir de la frecuencia de resonancia fundamental transversal:

$$MOE_{flex} \text{ [MPa]} = C \cdot M \cdot n^2 \cdot 10^{-6}$$

donde,

M = la masa de la probeta en kg.

n = la frecuencia longitudinal en Hz.

C = coeficiente cuyo valor para probetas prismáticas es:

$$C = 0,9464 \cdot \frac{L^3 \cdot T}{b \cdot t^3}$$

siendo L la longitud, b el ancho y t el espesor de la probeta, medidos en metros³.

³ Se considerará que la dimensión t a introducir en las fórmulas del cálculo del módulo de elasticidad dinámico a flexión será la dimensión de la cara perpendicular a la superficie de golpeo, tal y como se muestra en la Fig. 3–18.

T = un factor de corrección, el cual depende la relación entre el radio de giro (que la norma llama K) y la longitud de la probeta (L) $\Rightarrow K/L$ y del valor del coeficiente de Poisson (ν).

El radio de giro para un prisma es $K = t/3,464$.

Este factor de corrección se ha obtenido (Pickett, 1945), considerando un material isótropo con un coeficiente de Poisson de 0,17, a partir de la ecuación:

$$T_1 = 1 + 81,79 \cdot \left(\frac{K}{L}\right)^2 - \frac{1314 \cdot (K/L)^4}{1 + 81,09 \cdot (K/L)^2} - 125 \cdot \left(\frac{K}{L}\right)^4$$

Este factor para otro valor diferente del coeficiente de Poisson debe ser corregido según la ecuación siguiente (ASTM-C215, 2008):

$$T = T_1 \cdot \frac{1 + (0,26\mu + 3,22\mu^2) \cdot (K/L)}{1 + 0,1328 \cdot (K/L)}$$

En la Tabla 3–1, cuyos valores para $\mu = 0,17$ fueron calculados por Pickett, se presentan varios de los valores del coeficiente T para distintos valores de K/L y del coeficiente de Poisson, ν . Para valores intermedios se puede interpolar sin cometer un error muy significativo.

K/L	Valores de T			
	$\mu = 0.17$	$\mu = 0.20$	$\mu = 0.23$	$\mu = 0.26$
0.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.01	1.01	1.01	1.01	1.01
0.02	1.03	1.03	1.03	1.03
0.03	1.07	1.07	1.07	1.07
0.04	1.13	1.13	1.13	1.14
0.05	1.20	1.20	1.21	1.21
0.06	1.28	1.28	1.29	1.29
0.07	1.38	1.38	1.39	1.39
0.08	1.48	1.49	1.49	1.50
0.09	1.60	1.61	1.61	1.62
0.10	1.73	1.74	1.75	1.76
0.12	2.03	2.04	2.05	2.07
0.14	2.36	2.38	2.39	2.41
0.16	2.73	2.75	2.77	2.80
0.18	3.14	3.17	3.19	3.22
0.20	3.58	3.61	3.65	3.69
0.25	4.78	4.84	4.89	4.96
0.30	6.07	6.15	6.24	6.34

Tabla 3–1 Valores del factor de corrección T. (Pickett,1945)

En resumen, el valor del Módulo de Elasticidad Dinámico transversal o de flexión de acuerdo a la norma (ASTM-C215, 2008) será, en MPa:

$$MOE_{flex} [\text{MPa}] = 0,9464 \cdot \frac{L^3 \cdot T}{b \cdot t^3} \cdot M \cdot n^2 \cdot 10^{-6}$$

Por su parte, la anteriormente mencionada norma para piedra natural (UNE-EN_14146, 2004) establece en el apartado 8.3 que el módulo de elasticidad dinámico de flexión, calculado

a partir de la frecuencia de resonancia fundamental en el modo de vibración de flexión, F_F , para cualquier probeta viene dado por la siguiente ecuación,

$$Ed_F [MPa] = 4 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\pi^2 \cdot L^4}{4,73^4 \cdot i^2} \cdot (F_F)^2 \cdot \rho \cdot C$$

siendo,

L la longitud de la probeta, en m,

ρ la densidad aparente de la probeta, en kg/m^3 ,

i es el radio de giro de la sección de la probeta en m y cuyo valor es la raíz cuadrada del cociente del momento de inercia y el área de la sección. Así, para probetas prismáticas:

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{b \cdot t^3}{12 \cdot b \cdot t}}$$

C es un factor de corrección que depende de i y de μ (coeficiente de Poisson):

$$C = \frac{1}{2} + \frac{4,73^2}{2} \cdot \frac{i^2}{L^2} \cdot \left[1 + \frac{6}{5} \cdot 2(1 + \mu) \right] + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{4,73^2}{2} \cdot \frac{i^2}{L^2} \cdot \left[1 + \frac{6}{5} \cdot 2(1 + \mu) \right] + \frac{4,73^4}{2} \cdot \frac{i^4}{L^4} \cdot \left[1 - \frac{6}{5} \cdot 2(1 + \mu) \right]^2}$$

En la Tabla 3-2 se indican algunos de los valores de C para cualquier probeta con lo que se puede obtener C sin necesidad de resolver la ecuación anterior.

i/L	Coeficiente de Poisson μ								
	0,140	0,160	0,180	0,200	0,220	0,240	0,260	0,280	0,300
0,03	1,074	1,075	1,076	1,077	1,078	1,079	1,080	1,081	1,082
0,04	1,131	1,132	1,134	1,136	1,137	1,139	1,141	1,142	1,144
0,05	1,202	1,204	1,207	1,210	1,212	1,215	1,217	1,220	1,222
0,06	1,287	1,291	1,294	1,298	1,302	1,305	1,309	1,313	1,316
0,07	1,386	1,391	1,396	1,401	1,406	1,411	1,415	1,420	1,425
0,08	1,497	1,504	1,510	1,517	1,528	1,529	1,536	1,542	1,549
0,09	1,622	1,630	1,638	1,646	1,654	1,662	1,670	1,678	1,686
0,10	1,758	1,768	1,778	1,787	1,797	1,807	1,817	1,827	1,837

Tabla 3-2 Valor de C para cualquier probeta.

En el caso de probetas estándar de base cuadrada y si L viene expresada en metros, la ecuación anterior para el módulo de elasticidad dinámico de flexión se simplifica y queda,

$$Ed_F [MPa] = 15,136 \cdot 10^{-6} \cdot L^2 \cdot (F_F)^2 \cdot \rho \cdot C$$

con L expresada en metros, ρ en kg/m^3 y F_F en Hz,

En la Tabla 3-3 se pueden obtener valores de $C = 1,409$ a $1,451$ para μ variando de $0,14$ a $0,30$, para probetas prismáticas donde $L/b = 4$ y $i/L = 0,0722$, caso de las probetas RILEM normalizadas de $40 \times 40 \times 160$ mm. Para valores intermedios se interpolaría.

	Coeficiente de Poisson μ								
	0,140	0,160	0,180	0,200	0,220	0,240	0,260	0,280	0,300
Probetas prismáticas $\left(\frac{L}{b} = 4\right)$ $\left(\frac{i}{L} = 0,0722\right)$	1,409	1,414	1,419	1,425	1,430	1,435	1,440	1,446	1,450

Tabla 3-3 Valor de C para probetas estándar prismáticas.

También podemos calcular el módulo elástico dinámico de flexión a partir de la frecuencia fundamental utilizando la norma para productos refractarios (UNE-EN_ISO_12680-1, 2007), idéntica a la norma americana (ASTM-C1198-09, 2013).

La norma EN ISO 12680-1 define en el apartado 10.1 el cálculo del módulo de Young dinámico de flexión, a partir de la frecuencia de resonancia fundamental en el modo de vibración de flexión, F_F , en Hz, para probetas rectangulares como,

$$E [MPa] = 0,9465 \cdot 10^{-6} \cdot \left[\frac{m \cdot (F_F)^2}{b} \right] \cdot \left[\frac{L^3}{t^3} \right] \cdot T_1$$

donde,

L es la longitud, b el ancho y t el espesor de la probeta, medidos en mm.

m es la masa de la probeta, en g.

T_1 es un factor de corrección del modo fundamental en flexión que depende de la relación t/L y del coeficiente de Poisson, μ , y que se calcula a partir de la ecuación,

$$T_1 = 1 + 6,585 \cdot (1 + 0,0752\mu + 0,8109\mu^2) \cdot \left(\frac{t}{L}\right)^2 - 0,868 \cdot \left(\frac{t}{L}\right)^4 - J$$

donde,

$$J = \frac{\left[8,340 \cdot (1 + 0,2023\mu + 2,173\mu^2) \cdot \left(\frac{t}{L}\right)^4 \right]}{\left[1 + 6,338 \cdot (1 + 0,1408\mu + 1,536\mu^2) \cdot \left(\frac{t}{L}\right)^2 \right]}$$

Se puede observar que la expresión para el cálculo del módulo de elasticidad dinámico es la misma en todas las normas, la solución final varía según el cálculo del coeficiente C que pondera la forma y tamaño de la probeta, el modo de vibración y el coeficiente de Poisson.

3.3.4. Módulo de deformación transversal dinámico (G) de torsión.

La frecuencia fundamental a torsión, se determina mediante la misma técnica de resonancia por impacto de acuerdo a la norma ya mencionada (ASTM-C215, 2008) en su apartado 9.3. Los aparatos que se van a usar para medir esta frecuencia de torsión, así como su calibración, van a ser los mismos que los usados para determinar las otras frecuencias.

El procedimiento de ensayo también será el mismo, la única diferencia va a estar en la colocación del acelerómetro y el punto de impacto (Fig. 3-24).

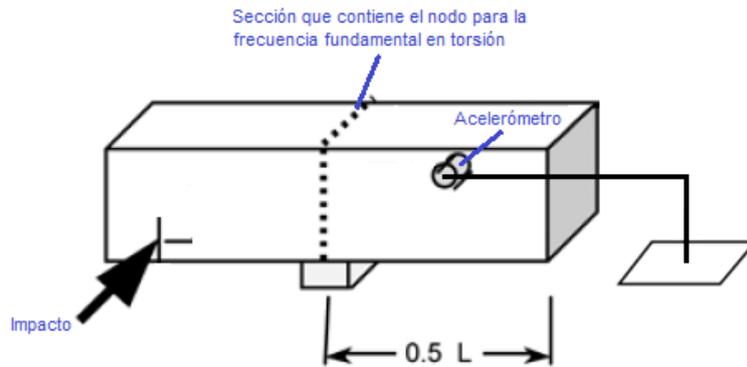


Fig. 3-24 Esquema de localización del golpeo y del acelerómetro para el modo de torsión.

En las Fig. 3-25 y Fig. 3-26 se muestra como se realizó el ensayo y cómo se obtienen los resultados del mismo. En esta última se observa cómo se excitan todos los modos de vibración, por lo que es necesario un conocimiento previo de la respuesta esperada para diferenciar correctamente cada una de las frecuencias de vibración fundamental.



a).- Colocación del acelerómetro.
b).- Golpeo.

Fig. 3-25 Colocación del acelerómetro uniaxial y localización del golpeo para frecuencia a torsión.

Si nos fijamos en la primera gráfica del espectro de la respuesta, la frecuencia de resonancia en torsión, eje de abscisas, se corresponde con el segundo pico de máxima amplitud. El primero corresponde a la frecuencia transversal ya que esta tiene una respuesta más temprana que la de torsión. La segunda gráfica corresponde a la coherencia que como ya se ha dicho conviene que sea cercana a uno para que asegurar una mayor calidad en el valor obtenido.

Estas mediciones se realizaron a cuatro lotes de tres probetas a diferentes edades, tanto con el acelerómetro uniaxial, como con el triaxial. Con el módulo de cizalladura y el módulo de deformación longitudinal calculados a partir de las mediciones realizadas con el acelerómetro triaxial no fue posible obtener valores precisos de la correlación de Poisson que era el dato buscado para poder calcular posteriormente del módulo de deformación para el modo de vibración transversal.

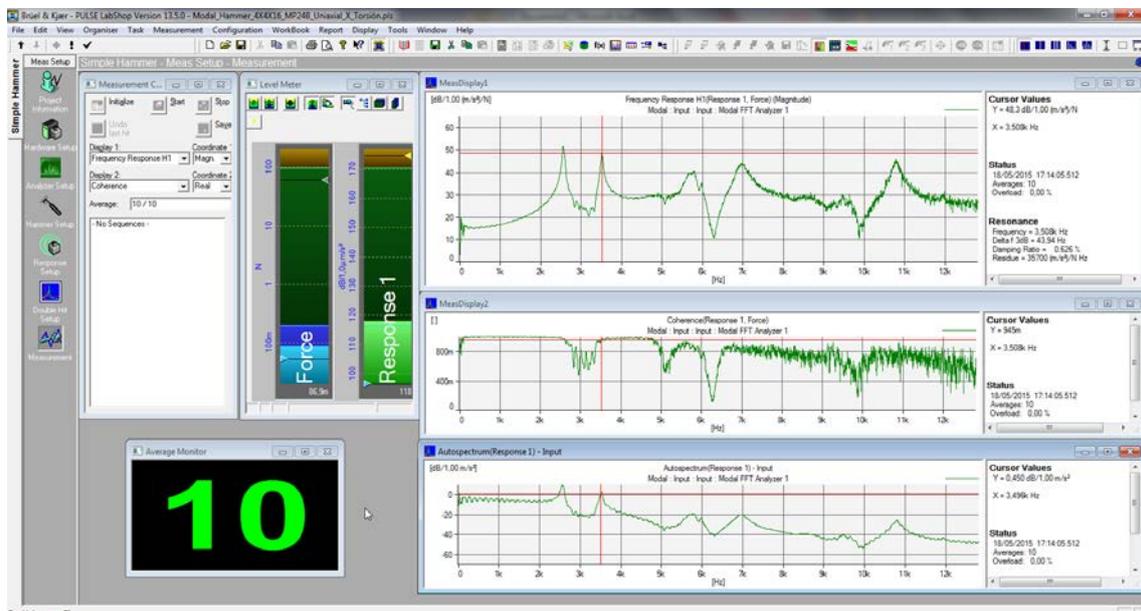


Fig. 3–26 Resultados del ensayo. Obtención de la frecuencia de vibración a torsión.

En el apartado 10.3 (ASTM-C215, 2008) se establece cómo calcular el módulo de rigidez dinámico a partir de la frecuencia de torsión fundamental, n , la masa y las dimensiones de la probeta,

$$Gd \text{ [MPa]} = B \cdot M \cdot (n'')^2$$

donde,

M = la masa de la probeta, en kg.

n'' = la frecuencia de torsión, en Hz.

$$B = \frac{4 \cdot L \cdot R}{A}, \text{ en m}^{-1}.$$

siendo,

L la longitud de la probeta, en m.

A el área de la sección transversal de la probeta, en m^2 .

R es un factor de forma, que para un prisma rectangular cuyas dimensiones de la sección son b y t , con t menor que b , vale,

$$R = \frac{\frac{t}{b} + \frac{b}{t}}{\frac{4t}{b} - 2,52 \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 + 0,21 \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^6}$$

que en el caso de un prisma de sección cuadrada $R = 1,183$.

3.3.5. Coeficiente de Poisson, ν .

Todos los parámetros necesarios para calcular el módulo de elasticidad o de Young se pueden medir en cada probeta u obtener por métodos dinámicos. Así L , b y t se obtienen midiendo con calibre cada probeta, la masa se calcula pesándola con una báscula de precisión y la frecuencia de vibración fundamental en cada uno de los modos, como se ha descrito, por el método de vibración por impacto.

Lo único que no se puede medir directamente es el coeficiente de Poisson del material, del mortero a estudio en este caso, aunque se puede determinar su valor de dos formas:

1. Buscar en bibliografía un valor aproximado del coeficiente de Poisson para morteros monocapas o para morteros de revestimientos o bien, si no es posible encontrarlo, bastará con el de un mortero en general. Este valor será válido porque todos los valores del coeficiente de Poisson de estos materiales son muy parecidos.

Este dato aunque no será el real, sí que será bastante aproximado, por lo que el error final cometido en el cálculo del módulo dinámico no será muy significativo. Así, por ejemplo, se usan valores del coeficiente de Poisson para morteros de cal y cemento de 0,22 (Rosell & Cantalapiedra, 2011) o valores de 0,20 para morteros de albañilería (Haach et al., 2013).

2. Se puede calcular el valor real del coeficiente de Poisson de acuerdo con el apartado 10.4 de la norma ASTM C215. Según éste apartado, el coeficiente de Poisson, o relación entre la deformación lateral y la longitudinal para un material isótropo, μ , se calcula como,

$$\mu = \frac{E}{2G} - 1$$

donde,

E es el módulo de elasticidad dinámico longitudinal, en MPa.

G es el módulo de deformación transversal dinámico, en MPa.

Este procedimiento se repitió para cuatro series de probetas con diferentes edades y dimensiones. El MOE_{long} se determinó a partir de la frecuencia de resonancia longitudinal medida a la vez que la de torsión. Primeramente se colocó el acelerómetro en una de las caras extremas y se golpeó en la otra y después se colocó el acelerómetro y se golpeó en las posiciones correspondientes para medir la frecuencia torsional tal y como se acaba de explicar.

El valor así obtenido y que se usó para el cálculo del módulo elástico dinámico de flexión es $\Rightarrow \mu = 0,21$.

3.3.6. Resultados preliminares.

Se ha decidido realizar una serie de ensayos preliminares para determinar las constantes elásticas dinámicas del mortero a estudio mediante una vibración por impacto. Para este test se han utilizado cada una de las tres probetas A, B y C de las muestras MP03, MP04, MP09, MP10, MP15 y MP16 de formato normalizado 40 x 40 x 160 mm lo que supone un total de 18 probetas.

En la Fig. 3–27 muestra el espectro de frecuencias que genera el software (PULSE) a partir de la señal enviada por el acelerómetro uniaxial para un ensayo en el modo fundamental de vibración longitudinal. El pico de frecuencia en el centro del gráfico, fácilmente reconocible por tener un valor de amplitud sensiblemente mayor, se corresponde con la frecuencia de resonancia buscada. En la parte inferior de la figura se muestra la coherencia entre la fuerza aplicada por el impacto del martillo y la aceleración sufrida por el transductor. Valores óptimos se sitúan en la unidad.

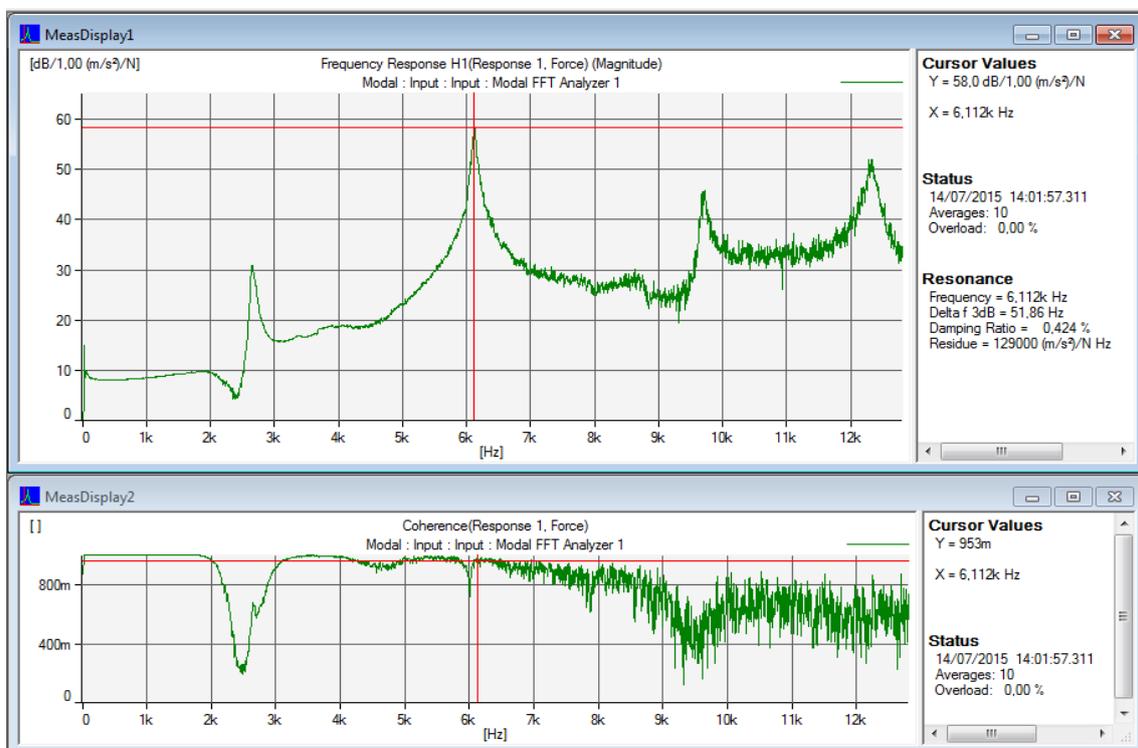


Fig. 3–27 Espectro de frecuencias en el modo de vibración longitudinal.

Además es posible reconocer con nitidez una segunda frecuencia de resonancia captada a la izquierda de la figura en el entorno de los 2.600 Hz.

Por su parte, la Fig. 3–28 muestra el espectro de frecuencias que genera el software con el acelerómetro uniaxial situado en la posición correspondiente a un ensayo en el modo de vibración de torsión. Los dos picos de frecuencia a la izquierda del gráfico, con los valores de amplitud más altos, se corresponden con frecuencias de resonancia.

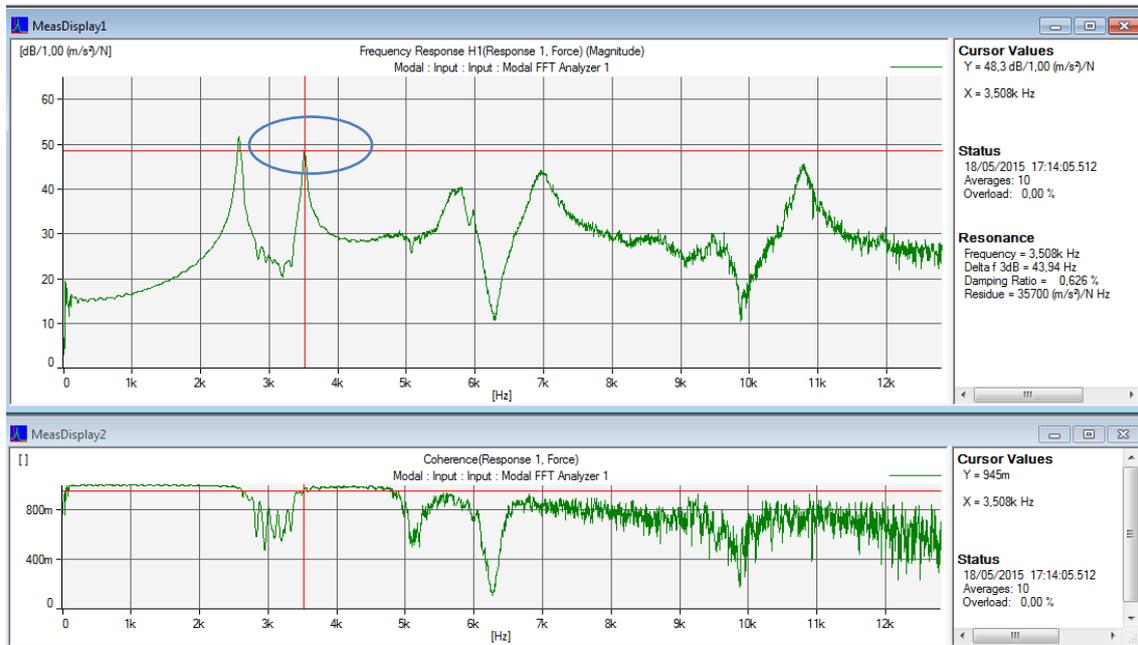


Fig. 3–28 Espectro de frecuencias en el modo de vibración en torsión.

De nuevo la coherencia se acerca a 1 lo que indica ausencia de perturbaciones en la salida ajenas al impacto y que el modelo de estimación es muy lineal e indicando globalmente una excelente calidad de las medidas del ensayo.

Como vemos, sobre la gráfica de frecuencias que aporta el software (PULSE) de tratamiento de las señales enviadas por el transductor no siempre es posible identificar correctamente la frecuencia de resonancia asociada con cada modo de vibración, si no se tiene un conocimiento previo del valor esperado aportado por el análisis numérico.

Con los resultados del MEF hemos podido confirmar que la frecuencia de resonancia de 6.112 Hz de la Fig. 3–27 se corresponde con el modo de vibración 6 de axil y que el segundo pico cercano a 2.500 Hz coincide con el modo de vibración 1 de flexión. Por su parte, en la Fig. 3–28, gracias a disponer de una aproximación de las frecuencias esperadas, se ha podido diferenciar que la frecuencia de resonancia detectada en 3.508 Hz es la calculada para el modo de vibración 3 de torsión; y la segunda -de menor valor- asignarla, como hicimos anteriormente, al modo de vibración 1 de flexión.

En la Tabla 3–4 se resumen los resultados del Módulo de Elasticidad Dinámico obtenidos para las 18 probetas ensayadas.

Probeta	Fecha Amasada	Fecha Ensayo	Masa	Dimensiones [mm]	Frecuencia Resonancia [Hz]	Módulo Elasticidad Dinámico [MPa]		C.V.
			[gr]	b x t x L				
MP03A			376,0		5.704	4.893		
MP03B	11/11/2014	09/12/2014	379,7		5.820	5.145	5.066	1,9%
MP03C			380,4		5.788	5.098		
MP04A			379,0	40 x 40 x 160	5.488	4.566		
MP04B	11/11/2014	09/12/2014	377,2		5.636	4.793	4.670	2,5%
MP04C			379,5		5.536	4.652		
MP09A			398,3		5.800	5.360		
MP09B	18/11/2014	16/12/2014	397,2		5.876	5.486	5.419	1,8%
MP09C			394,5		5.900	5.493		
MP10A			385,9	40 x 40 x 160	5.956	5.476		
MP10B	18/11/2014	16/12/2014	388,6		5.920	5.448	5.465	0,6%
MP10C			388,4		5.920	5.445		
MP15A			386,1		5.580	4.809		
MP15B	16/12/2014	13/01/2015	388,8		5.584	4.849	4.845	0,1%
MP15C			389,2		5.576	4.840		
MP16A			396,0	40 x 40 x 160	5.656	5.067		
MP16B	16/12/2014	13/01/2015	395,7		5.628	5.013	5.046	0,6%
MP16C			396,4		5.648	5.058		

Media 5.085

Tabla 3–4 Módulo de elasticidad dinámico longitudinal.

El resultado previo del Módulo de Elasticidad Dinámico medio de las 18 probetas ensayadas ha sido de 5.085 MPa, inferior al valor límite especificado en el DIT de 6.500 MPa. Los valores de los coeficientes de variación (C.V.) expresados en % de los resultados de cada lote, inferiores al 5%, acreditan la homogeneidad de las probetas y la bondad de las mediciones realizadas.

3.4. Plan de ensayos.

Para conseguir los objetivos marcados se van a realizar los ensayos que se han explicado en este capítulo en base al plan de ensayos que viene detallado en la Tabla 3–5 siguiente:

AMASADO	PROBETA	[días]											
		DIMENSIONES		MÓD. DE ELASTICIDAD						ROTURA			
		[mm]	DINÁMICO				ESTÁTICO COMPRESIÓN	ESTÁTICO FLEXIÓN	FLEXOTRACCIÓN	COMPRESIÓN			
			Longitudinal		Flexión								
11-nov-14	MP01	40 x 40 x 160								28	28	28	28
	MP02	40 x 40 x 160									28	28	28
	MP03	40 x 40 x 160	77	77									
	MP04	40 x 40 x 160	77	77									
18-nov-14	MP07	40 x 40 x 160									28	28	28
	MP08	40 x 40 x 160									28	28	28
	MP09	40 x 40 x 160	70	147	70	147	147		147	147	147	147	
	MP10	40 x 40 x 160	70	182	70	182	182		182	182	182	182	
16-dic-14	MP13	40 x 40 x 160								28	28	28	28
	MP14	40 x 40 x 160								28	28	28	28
	MP15	40 x 40 x 160	42	91	42	91	91		91	91	91	91	
	MP16	40 x 40 x 160	42	119	42	119	119		119	119	119	119	
24-mar-15	MP19	20 x 40 x 160	28	28						28	28		
	MP20	15 x 40 x 160	28	28						28	28		
	MP21	20 x 40 x 160	28	56	84	28	56	84	84		84		
	MP22	15 x 40 x 160	28	56	84	28	56	84	84		84		
	MP23	40 x 40 x 160	28	56	28 56		56		56	56	56	56	
	MP24	40 x 40 x 160	28	56	84	28	56	84	84		84	84	
	MP27	20 x 40 x 160	28	105						112	112		
	MP28	15 x 40 x 160	28	105						112	112		
31-mar-15	MP29	20 x 40 x 160	28	56						56	56		
	MP30	15 x 40 x 160	28	56						56	56		
	MP31	40 x 40 x 160	28	28		28		28	28	28	28		
	MP32	40 x 40 x 160	28	42	112	28	42	112	112		112	112	

Tabla 3–5 Plan de ensayos.

Se han planificado en las fechas señaladas la elaboración de 5 amasadas de probetas para la realización de los ensayos que se acaban de describir. Destacar que las 3 primeras series son las que se elaboraron para la caracterización del mortero a los 28 días y que, en parte, se han utilizado para seguir tomando datos con otras edades de curado. Al igual que se comentó en la numeración de las probetas para los ensayos del mortero endurecido, en cada serie se han realizado 3 amasadas, puesto que la capacidad de la amasadora sólo permite rellenar 2 moldes de 3 probetas por amasada salvo para las probetas de 15 x 40 x 160 mm y de 20 x 40 x 160 mm

(de ahora en adelante nos referiremos a ellas como estrechas) que no son probetas normalizadas y se realizaron adaptando los formatos normalizados de 40 x 40 x 160 mm y para las que de cada amasada se obtuvieron cuatro moldes.

Además se pudieron cortar seis probetas más a partir de muestras tomadas *in situ* de las fachadas de las viviendas afectadas. De cada muestra, etiquetas con las letras E y F, se extrajeron tres especímenes que fueron numerados de 1 a 3.

También se van a conservar dos grupos de probetas para ensayos de rotura a más largo plazo, MP03 y MP04, y otros cuatro lotes de formato normalizado se reservan para ensayos no programados.

Por último se moldearon seis muestras más utilizadas para los ensayos de retracción, para un total de 18 probetas. El formato normalizado en esta ocasión es de 25 x 25 x 285 mm y la numeración se corresponde con las ausencias en la Tabla 3–5 referidas al año 2014.

Por lo tanto se van a rellenar 34 moldes en diferentes fechas entre el 11 de noviembre de 2014 y el 31 de marzo de 2015. Se numerarán con dos letras, MP (Mortero Prismáticas) seguidas de dos números del 01 al 34, identificando a cada una de las probetas del molde con las letras A, B y C. En total se han fabricado 102 probetas, de las cuales 60 han sido del tamaño RILEM normalizado de 40 x 40 x 160 mm, 12 de 20 x 40 x 160 mm y otras 12 de 15 x 40 x 160 mm y las otras 18 utilizadas para el ensayo de retracción de 25 x 25 x 285 mm.

Las probetas más estrechas, con espesores de 15 mm y 20 mm similares al de un mortero de revestimiento puesto en obra, se han confeccionado con la idea de apreciar cómo influye en los resultados la variación en el espesor de la muestra y obtener así información o datos suficientes para correlacionarlos con los resultados obtenidos de las muestras extraídas del mortero *in situ*.

En cuanto a los días que se pueden ver en el plan de ensayos, se ha querido ir midiendo en diferentes probetas periodos de tiempo distintos para comprobar cómo evolucionan los resultados de los módulos de elasticidad y las resistencias con la edad. Se intentó obtener datos a los 28, 42, 56, 70, 84, 98, 112, 126, 154 días, es decir, cada dos semanas, pero finalmente no se consiguió esa exactitud porque los ensayos han estado ligeramente condicionados por los días no lectivos y por la disponibilidad del personal de laboratorio. Existen muchos ensayos realizados a los 28 días porque, aparte de que se han aprovechado los datos que se obtuvieron en la caracterización del mortero, es una fecha en la que se considera que el mortero ha adquirido casi toda la resistencia mecánica y por tanto tener datos suficientes para no inducir a error es importante.

De las pruebas previstas, el ensayo de resistencia (UNE-EN_1015-11, 2000) es de tipo destructivo, en el ensayo para la obtención del módulo de deformación estático bajo compresión (UNE-EN_1352, 1997) la probeta no se carga hasta la rotura pero es laborioso de instrumentación y, por último, el ensayo para calcular el módulo de deformación dinámico (ASTM-C215, 2008) es claramente no destructivo y de fácil repetibilidad.

Teniendo en cuenta las peculiaridades de cada uno de ellos se programa una secuencia que comienza en el laboratorio de acústica con los ensayos dinámicos y continúa, si la probeta está previsto que se rompa en esa fecha, en el taller de grandes estructuras con los procedimientos estáticos.

Una vez allí, primeramente se instrumenta con las galgas extensiométricas para medir la deformación y calcular el módulo de elasticidad estático bajo compresión y después se somete al ensayo de flexión en tres puntos manteniendo operativas las bandas para, junto al dato de carga aportado por la célula, obtener la gráfica tensión-deformación del mortero. Finalmente se rompen a compresión uniaxial.

Para completar el proceso de obtención de datos será necesario copiar los ficheros generados por el software cargado en el PC que está conectado a la cadena de medida, en el caso de los ensayos estáticos, o al analizador de frecuencias, en el caso de los dinámicos. Posteriormente se tratará esta información con una hoja de cálculo para determinar el valor de cada una de las propiedades mecánicas y elásticas del mortero. Finalmente se vuelcan a una base de datos para su filtrado y análisis.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM-C215. (2008). Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens. *Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials*.
- ASTM-C1198-09. (2013). Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for Advanced Ceramics by Sonic Resonance. *Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials*.
- Deniz, S., & Erdoğan, S. T. (2015). Prediction of elastic moduli development of cement mortars using early age measurements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(1). doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001025
- Haach, V. G., Carrazedo, R., Oliveira, L. M. F., & Corrêa, M. R. S. (2013). Application of acoustic tests to mechanical characterization of masonry mortars. *NDT and E International*, 59, 18-24. doi: 10.1016/j.ndteint.2013.04.013
- Jones, R. (1962). *Non-destructive Testing of Concrete*.
- Kolluru, S. V., Popovics, J. S., & Shah, S. P. (2000). Determining elastic properties of concrete using vibrational resonance frequencies of standard test cylinders. *Cement, Concrete and Aggregates*, 22(2), 81-89.
- Lu, X., Sun, Q., Feng, W., & Tian, J. (2013). Evaluation of dynamic modulus of elasticity of concrete using impact-echo method. *Construction and Building Materials*, 47, 231-239. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.04.043
- Malaikah, Ala, Al-Saif, Khalid, & Al-Zaid, Rajeh. (2004). Prediction of the dynamic modulus of elasticity of concrete under different loading conditions. *International Conference On Concrete Engineering and Technology*.
- Martínez-Molina, W., Torres-Acosta, A. A., Jáuregui, J. C., Chávez-García, H. L., Alonso-Guzmán, E. M., Graff, M., & Arteaga-Arcos, J. C. (2014). Predicting concrete compressive strength and modulus of rupture using different NDT techniques. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014. doi: 10.1155/2014/742129
- Nagy, A. (1997). Determination of E-modulus of young concrete with nondestructive method. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 9(1), 15-20.
- Picket, G. (1945). Equations for Computing Elastic Constants from Flexural and Torsional Resonant Frequencies of Vibration of Prisms and Cylinders. *Proceedings of the American Society for Testing and Materials. Portland Cement Association, Vol. 45*, 846-865.
- Popovics, Jonh S., Zemajtis, J., & Shkolnik, I. (2008). A study of static and dynamic modulus of elasticity of concrete.
- Rosell, J. R., & Cantalapiedra, I. R. (2011). Simple method of dynamic Young's modulus determination in lime and cement mortars. *Materiales de Construcción*, 61(301), 39-48. doi: 10.3989/mc.2010.53509
- Toma, I. O., Covatariu, D., Toma, A. M., Taranu, G., & Budescu, M. (2013). Strength and elastic properties of mortars with various percentages of environmentally sustainable mineral binder. *Construction and Building Materials*, 43, 348-361. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.061

- UNE-EN_1015-11. (2000). Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido. *AENOR*.
- UNE-EN_1352. (1997). Determinación del módulo de elasticidad estática bajo compresión del hormigón curado en autoclave o de áridos ligeros con estructura abierta. *AENOR*.
- UNE-EN_14146. (2004). Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del módulo de elasticidad dinámico (con la medida de la frecuencia de resonancia fundamental). *AENOR*.
- UNE-EN_ISO_12680-1. (2007). Métodos de ensayo para productos refractarios. Parte 1: Determinación del módulo de Young dinámico (MOE) por excitación de la vibración por impulso. *AENOR*.

Análisis de datos y resultados.

4.1. INTRODUCCIÓN.....	133
4.2. RESISTENCIA A FLEXIÓN Y A COMPRESIÓN.....	134
4.3. MÓDULO DE DEFORMACIÓN ESTÁTICO ($E_{M,S}$).....	136
4.4. ANÁLISIS NUMÉRICO.....	142
4.5. MÓDULO DE DEFORMACIÓN DINÁMICO (MOE).....	145
4.5.1. EVOLUCIÓN EN EL TIEMPO.....	150
4.5.2. RELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE DEFORMACIÓN Y LA RESISTENCIA.....	152
4.5.3. RELACIÓN ENTRE MÓDULO DE DEFORMACIÓN ESTÁTICO Y DINÁMICO.....	154
4.5.4. EFECTO TAMAÑO.....	155
4.6. COEFICIENTE DE POISSON, ν.....	157

En este capítulo sometemos a examen los valores calculados a partir de los datos aportados por los ensayos. Se analizará de forma individualizada cada resultado y su evolución en el tiempo con la ayuda de gráficas. También se correlacionan las distintas propiedades mecánicas y elásticas del mortero estudias.

Todos los resultados de los ensayos realizados se han incluido en un anexo adjunto al presente documento.

4.1. Introducción.

Todas las muestras de mortero analizadas han sido amasadas con el mismo producto, un mortero industrial para revoco predosificado, al que se le ha añadido una proporción de agua del 24%, siguiendo las especificaciones y condiciones indicadas por el fabricante. Además se han empleado los mismos útiles y se ha procedido de acuerdo a la normativa en su elaboración (UNE-EN_1015-2, 1999) y conservación en todos los casos (UNE-EN_1015-11, 2000).

De esta forma conseguimos un mortero homogéneo para todas las muestras donde sabemos que las proporciones de sus componentes en la mezcla permanecen estables. Así, la relación agua/cemento, fijada a partir de la prescripción de la cantidad de agua necesaria para el amasado, el tipo de árido utilizado y su porcentaje final y los aditivos añadidos, vienen determinados directa o indirectamente por el proceso de fabricación.

Todos ellos son aspectos importantes a la hora de determinar las características mecánicas y las propiedades elásticas del material y, al quedar fijados, los cambios detectados los podremos relacionar fácilmente con las variables modificadas y comprobar su influencia sobre la determinación del módulo de deformación del mortero, en línea con los objetivos fijados para este trabajo.

Con este procedimiento se espera que las propiedades mecánicas y las constantes elásticas a relacionar lo sean en función, aparte del tiempo, de las dimensiones de la probeta y del tipo de ensayo realizado.

Se analizan por capítulos las propiedades mecánicas del mortero, recogiendo su evolución y la relación, si ha sido posible encontrarla, con el módulo de deformación dinámico. Además, se ha hecho un apartado diferenciado para el cálculo del coeficiente de Poisson por su implicación en la obtención de otros resultados.

La resistencia, y por fuerza el resto de propiedades analizadas, se ha determinado de forma preferente a los 28 días por ser este el valor comúnmente aceptado para la prescripción de los morteros. No obstante se han realizado ensayos a distintas edades hasta un periodo máximo de 182 días.

Así, las gráficas que muestran la evolución en el tiempo de las propiedades del mortero abarcan hasta dicho periodo y en general se han elaborado con valores medios del conjunto de muestras ensayadas en cada fecha.

4.2. Resistencia a flexión y a compresión.

Las resistencias del mortero a 28 días obtenidas de acuerdo al método de ensayo normalizado (UNE-EN_1015-11, 2000) para probetas enmoldadas ya fue estudiada en el capítulo dedicado a la caracterización del material y arrojó un dato medio de resistencia a flexotracción de 2,7 MPa y una resistencia a compresión uniaxial media de 7,4 MPa.

De la comparación de ambas resistencias para todas las probetas ensayadas a esta edad y de dimensiones normalizadas 40 x 40 x 160 mm se obtienen resultados bien correlacionados, de forma que, conociendo uno de ellos, se podría obtener el otro con una sencilla expresión. Con los resultados obtenidos a partir del valor medio de tres probetas se ha realizado una regresión lineal que se ajusta adecuadamente a los datos observados y que se representa en la Fig. 4-1.

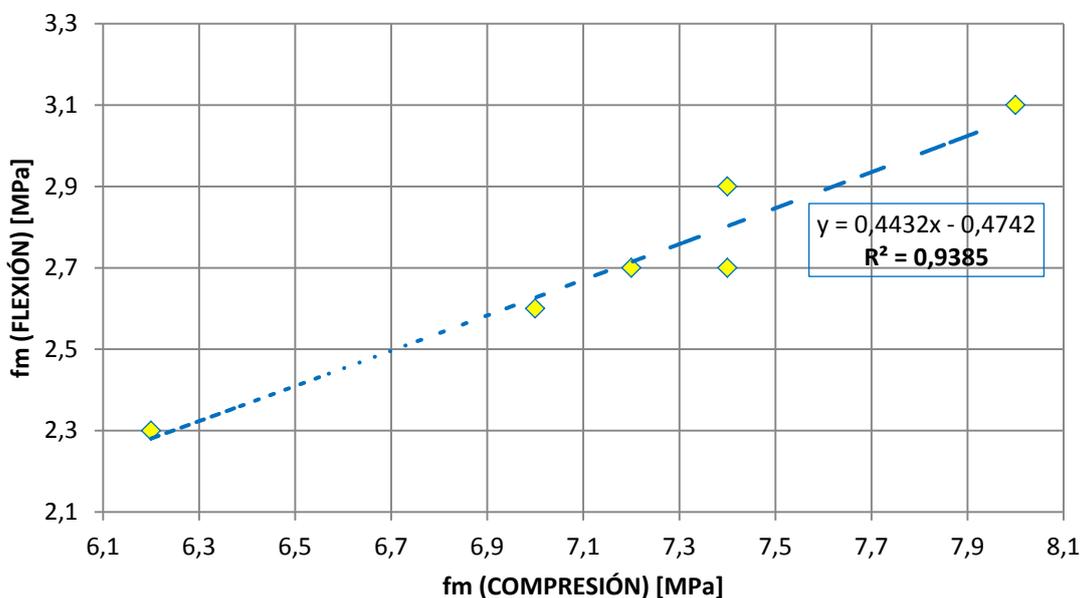


Fig. 4-1 Comparación de resistencias a compresión y flexión a 28 días.

Se ha repetido el método de ensayo citado adaptándolo a un ancho de sección variable y diferenciando resultados a distintas edades. Además del formato normalizado se ensayaron tamaños de 20 x 40 x 160 mm y de 15 x 40 x 160 mm. Por su parte, la edad de las probetas varía entre los 28 días y los 182 días a excepción de las muestras extraídas *in situ*.

Dado que este ensayo es destructivo, representa el punto final de una serie de pruebas previas programadas para las muestras y puede verse afectado por la instrumentación. En este caso todas las probetas se disponen al menos con una banda extensiométrica en la cara traccionada para obtener deformaciones durante el ensayo de flexión y, si su tamaño es el normalizado, de otra banda más en la cara de compresión necesaria para obtener previamente el módulo de deformación estático. Finalmente se determina la carga máxima a compresión uniaxial de los dos semiprismas resultantes de la rotura de la probeta a flexión, sin embargo

esto no se hizo en probetas de ancho menor de 40 mm, por no resultar un dato que se pueda correlacionar directamente con el valor normalizado.

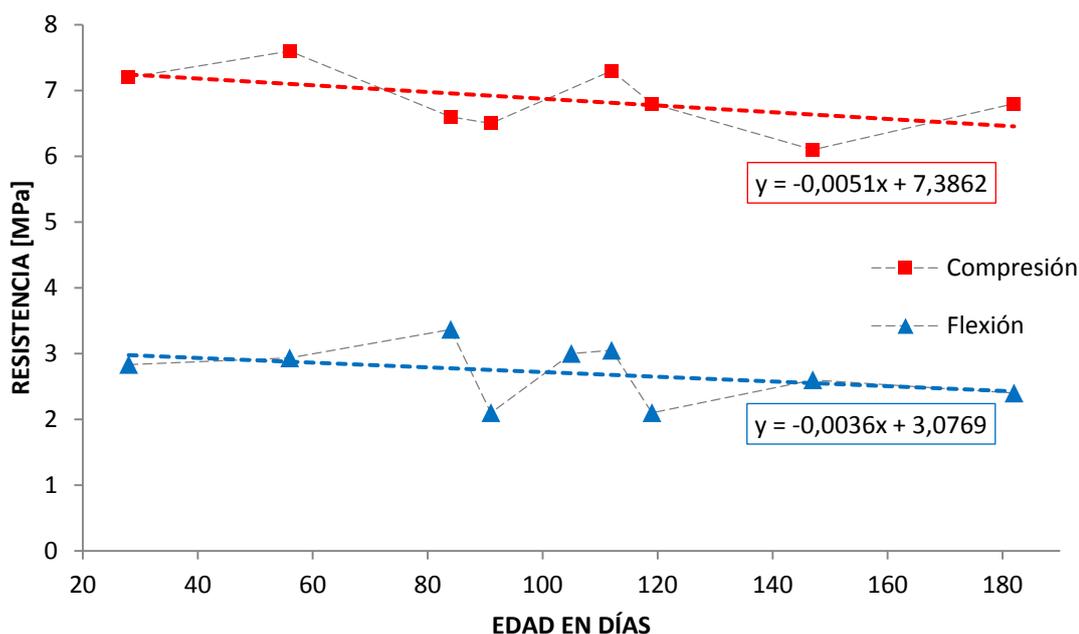


Fig. 4-2 Evolución de la resistencia del mortero.

Los resultados se comparan en la Fig. 4-2. La evolución de las resistencias en el tiempo es decreciente en todos los casos, aunque ligeramente más acentuada para la resistencia a compresión. Resultados similares se relacionan con la humedad y temperatura de curado (Esteves, Cachim, & Ferreira, 2007; Swamy & Rigby, 1971).

Esta tendencia está motivada por la pérdida de agua interna durante el proceso de secado que deriva en un material muy poroso y poco compacto con la consiguiente disminución de su resistencia (Chen, Wu, & Zhou, 2013). Además se refleja en la disminución medida en los valores de densidad del mortero y en la estructura interna muy porosa observada en las micrografías.

El efecto de la pérdida de humedad de las muestras durante este proceso puede tener efectos contrapuestos dependiendo de las características del material. Si la proporción de cemento es baja, la retracción por secado aumenta por una menor resistencia a tracción del mortero y provoca que sus propiedades mecánicas evolucionen a la baja (Yurtdas, Peng, Burlion, & Skoczylas, 2006). Además, el uso de polímeros superabsorbentes provoca con el tiempo que el mortero presente una microestructura más porosa (Paiva, Esteves, Cachim, & Ferreira, 2009). Todos estos factores están influyendo en alguna medida en el comportamiento reflejado en la Fig. 4-2.

Más allá de la ordenada del gráfico disponemos de datos de las muestras de mortero extraídas *in situ* ensayadas por el mismo método y que, dentro de la serie de 15 x 40 x 160 mm, han dado valores de resistencia a flexión de 2,3 y 2,4 MPa acorde con la tendencia marcada.

4.3. Módulo de deformación estático ($E_{m,s}$).

Se ha seguido el método de determinación del módulo de elasticidad estática bajo compresión normalizado (UNE-EN_1352, 1997) adaptado a probetas de mortero de dimensiones 40 x 40 x 160 mm (Fig. 4-3). Se prefirió, para medir sus acortamientos, instrumentarlas con galgas extensiométricas que son más sensibles a las pequeñas deformaciones asociadas con cada escalón de carga.



Fig. 4-3 Ensayo bajo compresión.

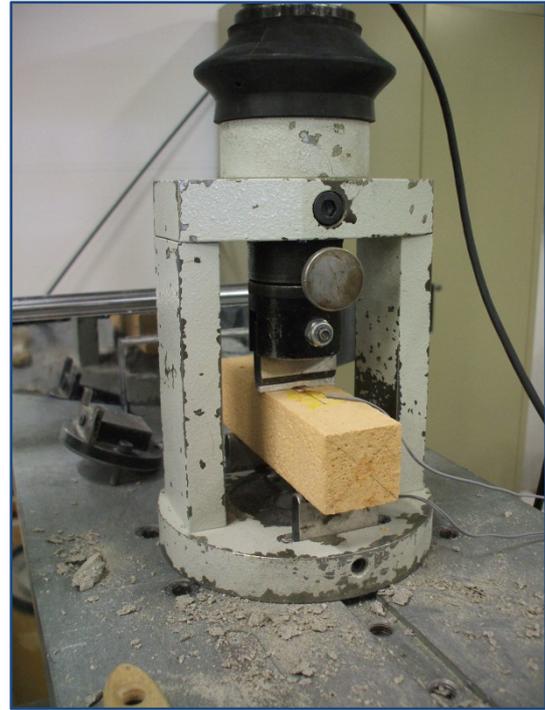


Fig. 4-4 Ensayo de flexión.

Acabado este ensayo se siguió un segundo procedimiento para la obtención de $E_{m,s}$ (Fig. 4-4). Después de efectuados los ciclos de carga y descarga y anotados los valores de deformación, se dispuso el utillaje para realizar un ensayo clásico de flexión en tres puntos (UNE-EN_1015-11, 2000).

Además de los valores de resistencia ya comentados, dicho ensayo permitió obtener medidas relacionadas de carga y deformación. Del tratamiento posterior de los datos registrados por la cadena de medida se obtuvieron las clásicas gráficas de tensión-deformación del material sobre las que, aplicando un cálculo de regresión lineal sobre la parte elástica, se pudo obtener el valor del módulo de deformación estático del mortero, $E_{m,s}$ (Fig. 4-5 y Fig. 4-6).

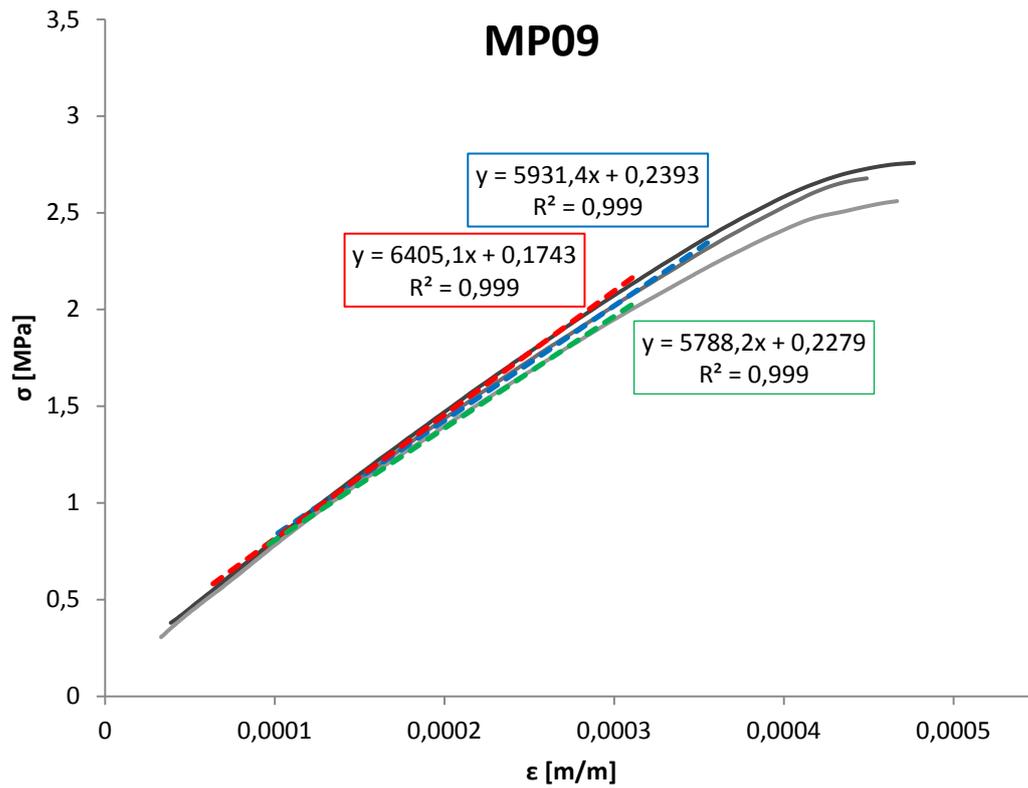


Fig. 4-5 Cálculo de $E_{m,s}$ con los datos obtenidos de la banda en tracción durante el ensayo de flexión.

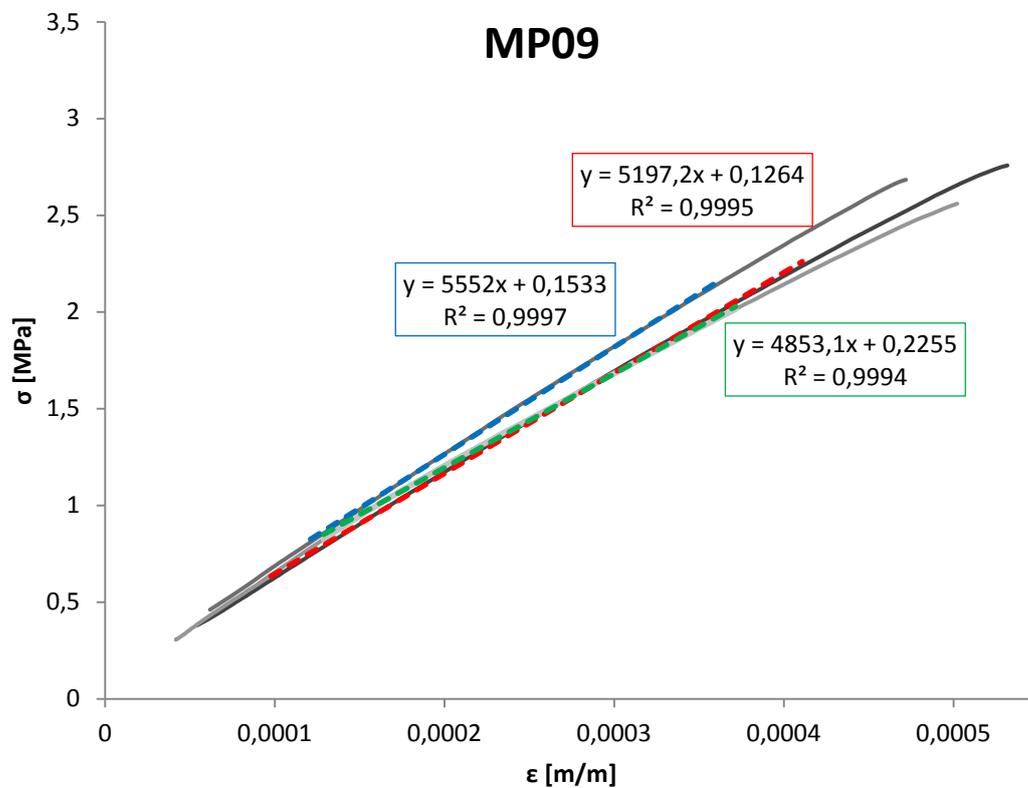


Fig. 4-6 Cálculo de $E_{m,s}$ a partir de los datos obtenidos de la banda en compresión en el mismo ensayo.

En la Fig. 4-5 se muestran los resultados obtenidos siguiendo el proceso de cálculo mencionado para los módulos de deformación de las tres probetas del lote MP09. Las gráficas se han dibujado cruzando los datos aportados por el canal de la célula de carga y el de la banda extensiométrica pegada a la cara traccionada de la probeta durante el ensayo de flexión en tres puntos. Con el valor de la carga y la distancia entre apoyos calculamos el momento máximo en el centro de la pieza y, a partir de este, la tensión sobre la fibra extrema de la sección donde se sitúa la banda.

En la Fig. 4-6 se han obtenido los mismos resultados pero con los datos aportados por la galga extensiométrica de la cara opuesta en compresión.

A la hora de precisar sobre el gráfico el tramo sobre el que calcular la pendiente de la recta que expresa el valor del módulo de deformación, se ha buscado que el coeficiente de determinación lineal R^2 tome valores cercanos a la unidad que presten una mayor fiabilidad al valor.

La bondad del ajuste de la recta de regresión a los datos obtenidos expresa un alto grado de asociación lineal entre las variables que se relacionan, tensión-deformación, lo que indica un apreciable comportamiento elástico del mortero. Este tramo elástico del material es más acentuado en las gráficas dibujadas a partir de la información proporcionada por la banda en compresión y que se repite en la totalidad de muestras analizadas, como se puede comprobar en el anexo de resultados.

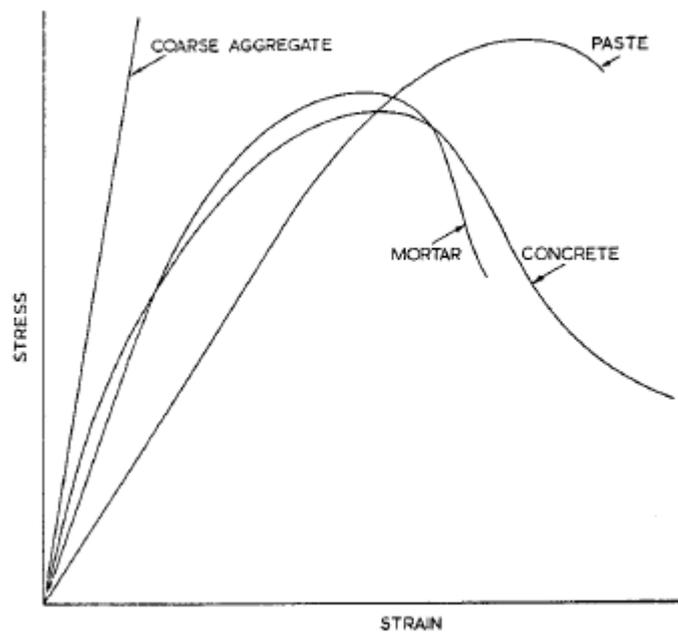


Fig. 4-7 Gráficas características de distintos materiales cementosos.

La aparición de fisuras, los cambios de volumen durante el fraguado y endurecimiento y la heterogeneidad inherente debido a las distintas rigideces de sus componentes hacen que el mortero y, en mayor medida, el hormigón se desvíen de un comportamiento lineal (Fig. 4–7) (Swamy & Rigby, 1971). Sin embargo, de las gráficas obtenidas se desprende que el mortero utilizado en los ensayos tiene un tramo elástico más prolongado del que cabe esperar de un mortero tradicional, con una rigidez más baja y una rotura frágil o cuasi-frágil característica, sin apenas plastificar.

En la Fig. 4–8 se comparan distintos valores del módulo de deformación estático del mortero, $E_{m,s}$, obtenidas de probetas de dimensiones normalizadas 40 x 40 x 160 mm con los procedimientos ya descritos, bajo compresión (marca triangular) y flexión (marcas circulares y cuadradas). Cada punto representa el valor medio de todas las probetas ensayadas con la misma edad.

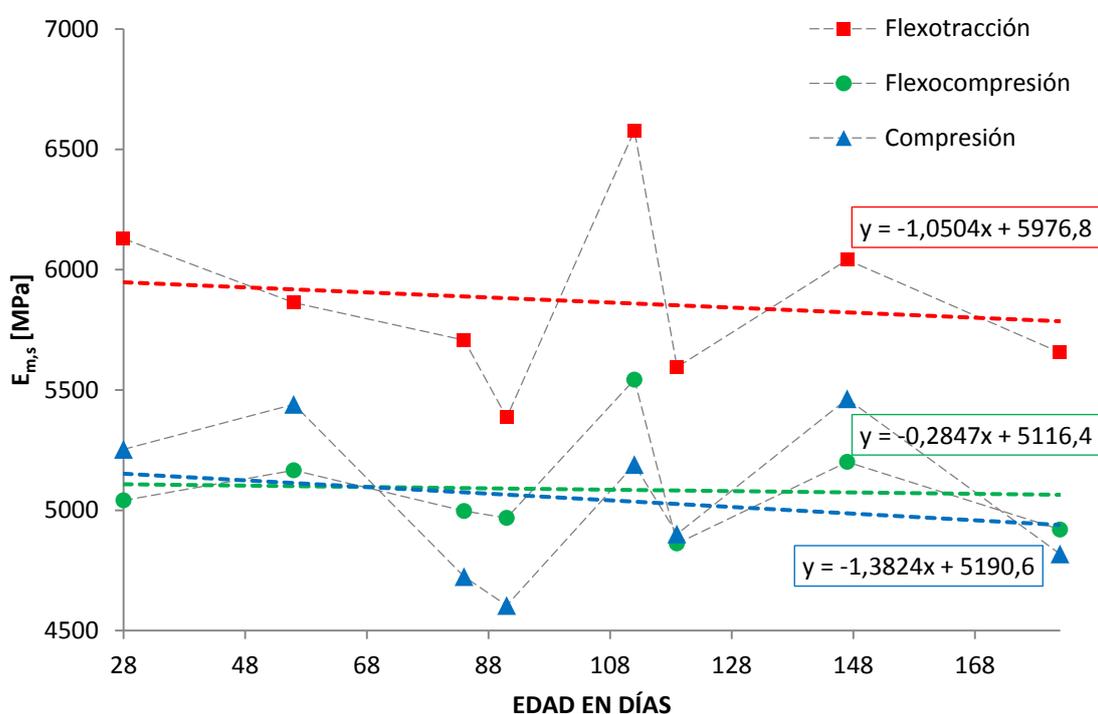


Fig. 4–8 Evolución del módulo de deformación estático según el tipo de ensayo.

Aunque hay dispersión en los datos, como por otra parte es de esperar de los ensayos estáticos, es posible apreciar una disminución general de todos los valores con la edad y una mayor aproximación entre el módulo de deformación estático bajo compresión (marca triangular) obtenido con el método de ensayo normalizado (UNE-EN_1352, 1997) y el calculado a partir de los valores medidos en el ensayo de flexión (marca circular) (UNE-EN_1015-11, 2000), también en compresión. Ambos valores se sitúan en el rango de los 5.100 MPa.

Sin embargo de la galga extensiométrica situada en la cara de tracción (marca cuadrada) de este último ensayo se obtienen valores mayores de $E_{m,s}$, en torno a los 6.000 MPa, en parte porque la colocación de esta banda supone un refuerzo, a modo de armadura, que aumenta las características resistentes de las probetas.

Este mismo comportamiento es extensible a los valores de $E_{m,s}$ calculados con los datos aportados por la banda de tracción pero esta vez en los ensayos con diferentes anchos de probetas, Fig. 4–9. Como la banda es siempre la misma, menores anchos de sección conducen a mayores tensiones en el mortero y mayores módulos elásticos.

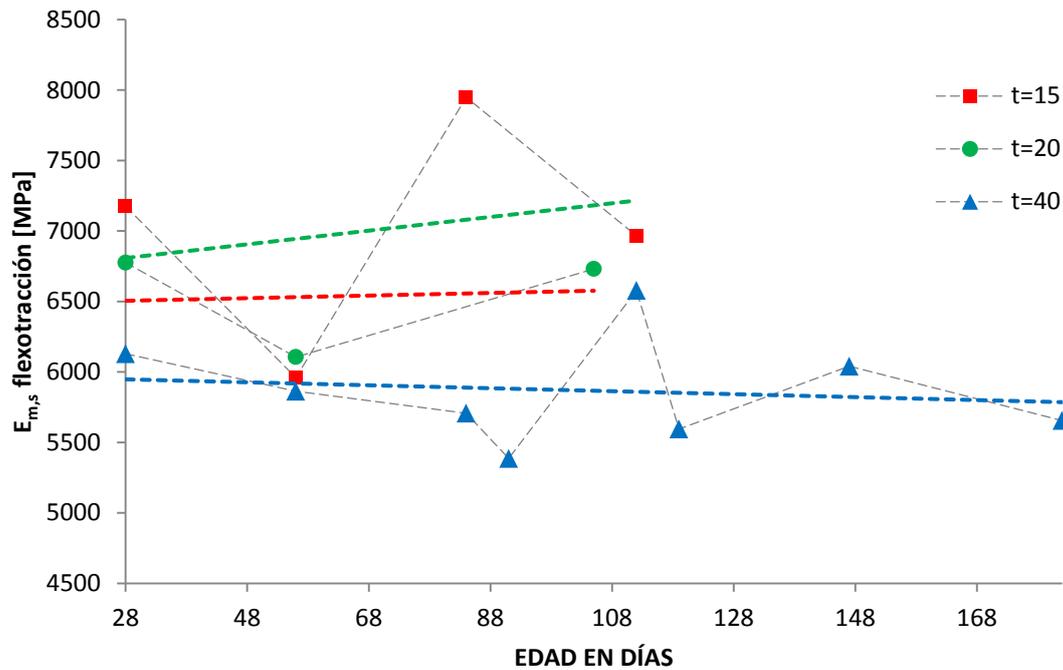


Fig. 4–9 Valor de $E_{m,s}$ calculado a partir de la banda en tracción para diferentes anchos de probeta

Ya hemos visto que sólo por el secado, sin necesidad de aplicar ninguna carga, se producen cambios en los límites de resistencia del mortero. Este mismo fenómeno explica el comportamiento de sus propiedades elásticas, a medida que la microfisuración del material se hace más significativa, debido a una mayor pérdida de humedad, el módulo de deformación disminuye.

Las diferencias encontradas entre el valor calculado a los 28 días y los 182 días no son muy significativas, con una variación porcentual de entre el 1% y el 4%. Otros autores encuentran pérdidas en el valor del módulo de Young de hasta un 15% o un 18% dependiendo de la relación agua/cemento y la edad de la muestra (Yurtdas et al., 2006).

Por último, si comparamos los módulos de deformación estáticos con las resistencias, para probetas de formato normalizado 40 x 40 x 160 mm, tal y como era de esperar su valor aumenta al aumentar estas, tanto si hablamos de la resistencia a flexión (Fig. 4–10) como a compresión uniaxial (Fig. 4–11). Además sigue siendo evidente el valor más elevado del módulo de deformación obtenido a partir de los datos de la banda en tracción.

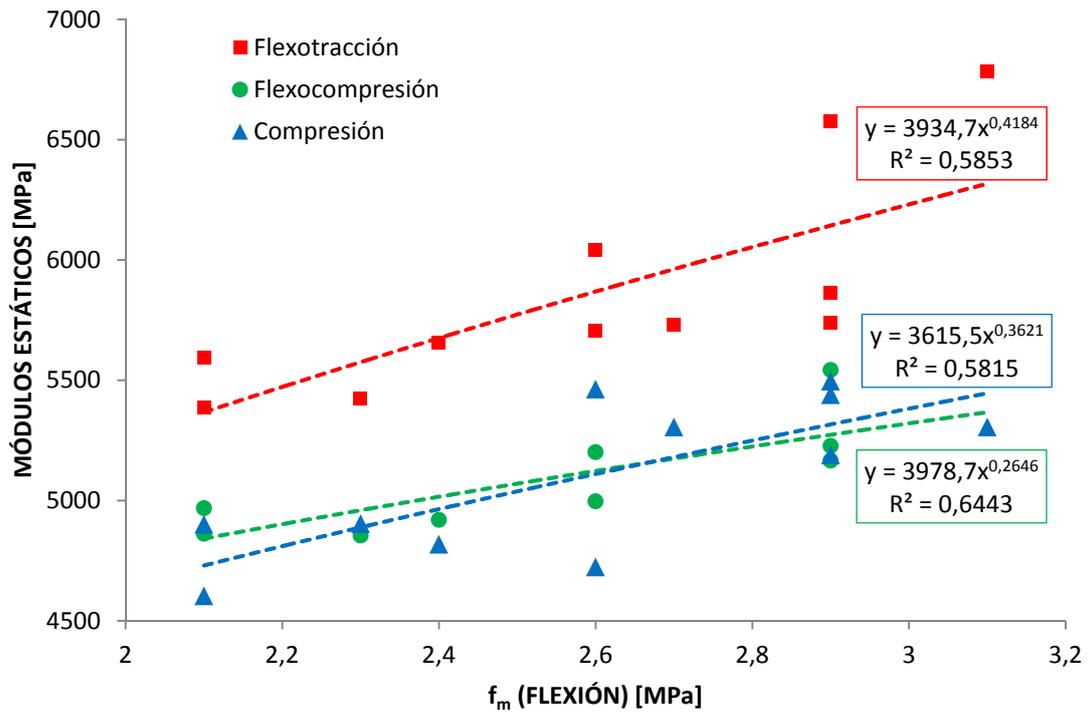


Fig. 4-10 Comparación de valores de E_{m,s} respecto a las resistencias a flexión.

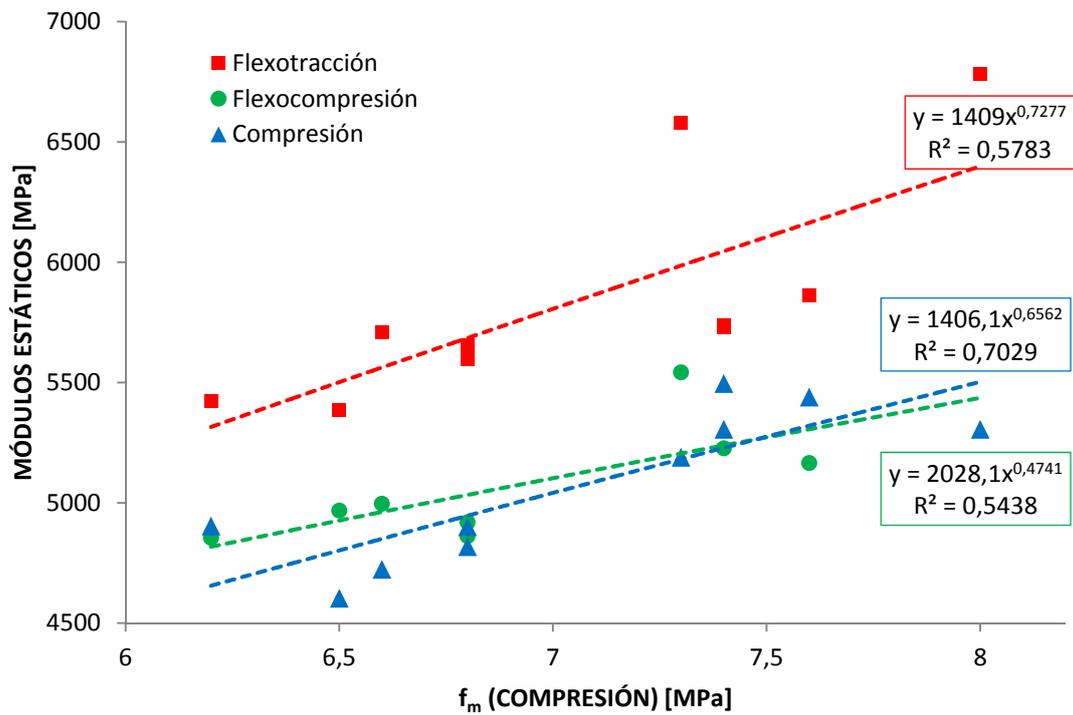


Fig. 4-11 Comparación de valores de E_{m,s} respecto a las resistencias a compresión.

4.4. Análisis numérico.

Desde las primeras decisiones en la programación de los ensayos fue útil contar con una herramienta de análisis basada en el método de los elementos finitos (MEF). Entonces se pudo aproximar el tamaño adecuado de las probetas que, dentro de los espesores usuales de aplicación de los morteros de revestimiento, ofrecía unas frecuencias de resonancia en rangos fácilmente identificables durante el ensayo.

A continuación se incluye la Fig. 4–12 con los modos de vibración simulados para la probeta prismática de 40 x 40 x 160 mm, que se han detallado en el apartado 2.4.6.

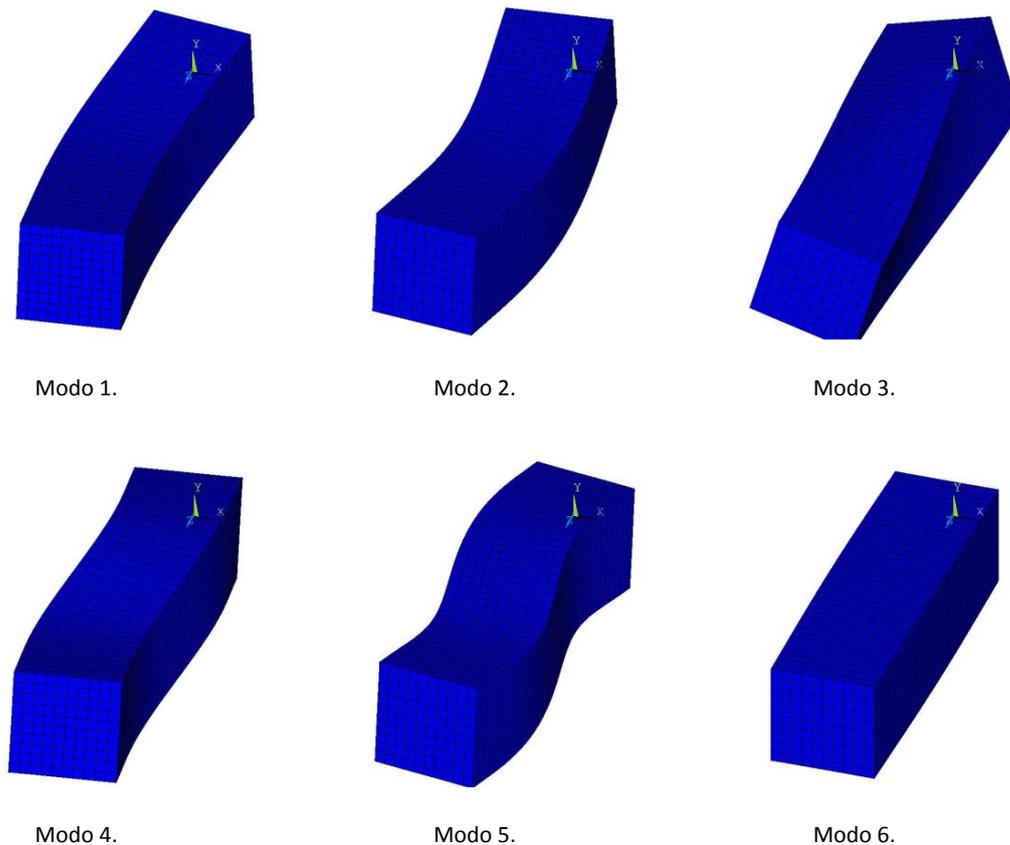


Fig. 4–12 Modos de vibración de la probeta de formato normalizado 40 x 40 x 160 mm

Posteriormente también se utilizó el MEF, mediante la creación de una rutina de cálculo, para relacionar en un gráfico las frecuencias esperadas con las propiedades elásticas del material y disponer en todo momento de una plantilla (Fig. 4–13) que permitiese un contraste inmediato de los datos arrojados durante el procedimiento de ensayo.

Los módulos de deformación y de cizalladura dinámicos asociados con los modos de vibración longitudinal, transversal y de torsión se representan en función de las frecuencias de resonancia fundamental esperadas para las probetas normalizadas de formato 40 x 40 x 160 mm utilizadas en este trabajo. Se ha adoptado para el cálculo un valor medio de la densidad de 1.500 kg/m³ y un coeficiente de Poisson de 0,2.

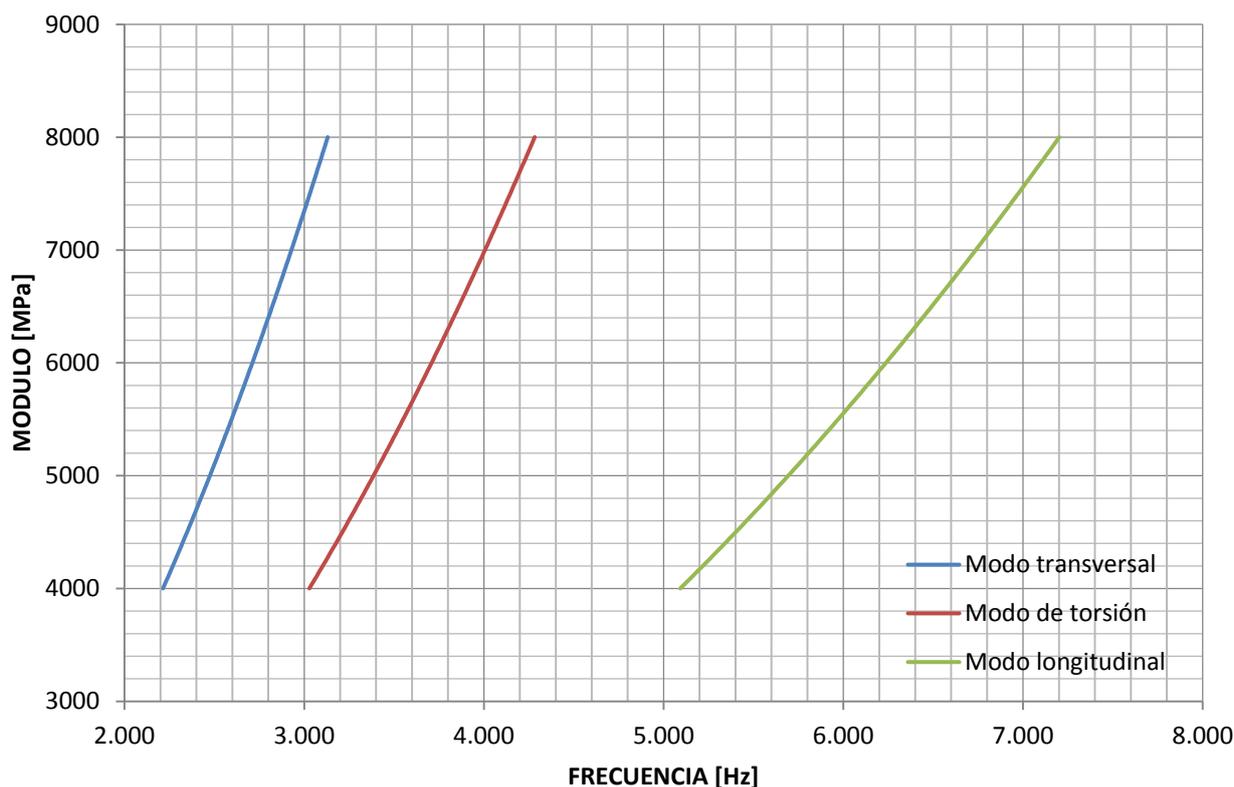


Fig. 4-13 Variación de MOE y G para cada modo de vibración en función de la frecuencia de resonancia.

Para un rango de módulos de deformación de 4.000 a 8.000 MPa, que abarca holgadamente la totalidad de datos analizados, se han obtenido intervalos de frecuencias sensiblemente mayores para el modo de vibración longitudinal. Mientras que para las frecuencias más bajas, modo de vibración transversal, resulta un rango de valores de 2. 214 a 3. 131 Hz, en el lado opuesto nos encontramos con variaciones de frecuencias en el intervalo de 5.092 a 7.202 Hz.

Como en cualquier medición, en los datos aportados por el acelerómetro piezoeléctrico fijado a las probetas tendremos una desviación que será mayor al aumentar la frecuencia, por razones de precisión del propio aparato. A la vista de Fig. 4-13 cabe esperar, según lo expuesto, que los errores asociados al procedimiento de ensayo penalicen especialmente al cálculo del MOE en el modo de vibración longitudinal.

En la Fig. 4-14 se representa esta vez la relación entre el módulo de deformación dinámico en el modo de vibración transversal y la frecuencia de resonancia fundamental calculados mediante el MEF para probetas no normalizadas de formato 40 x 160 mm y espesor variable que coinciden en parte con las utilizadas en este estudio y que en general se corresponden con medidas usuales de muestras obtenidas de morteros puestos en obra. Se ha vuelto a adoptar un valor medio para la densidad de 1.500 kg/m³ y un coeficiente de Poisson de 0,2.

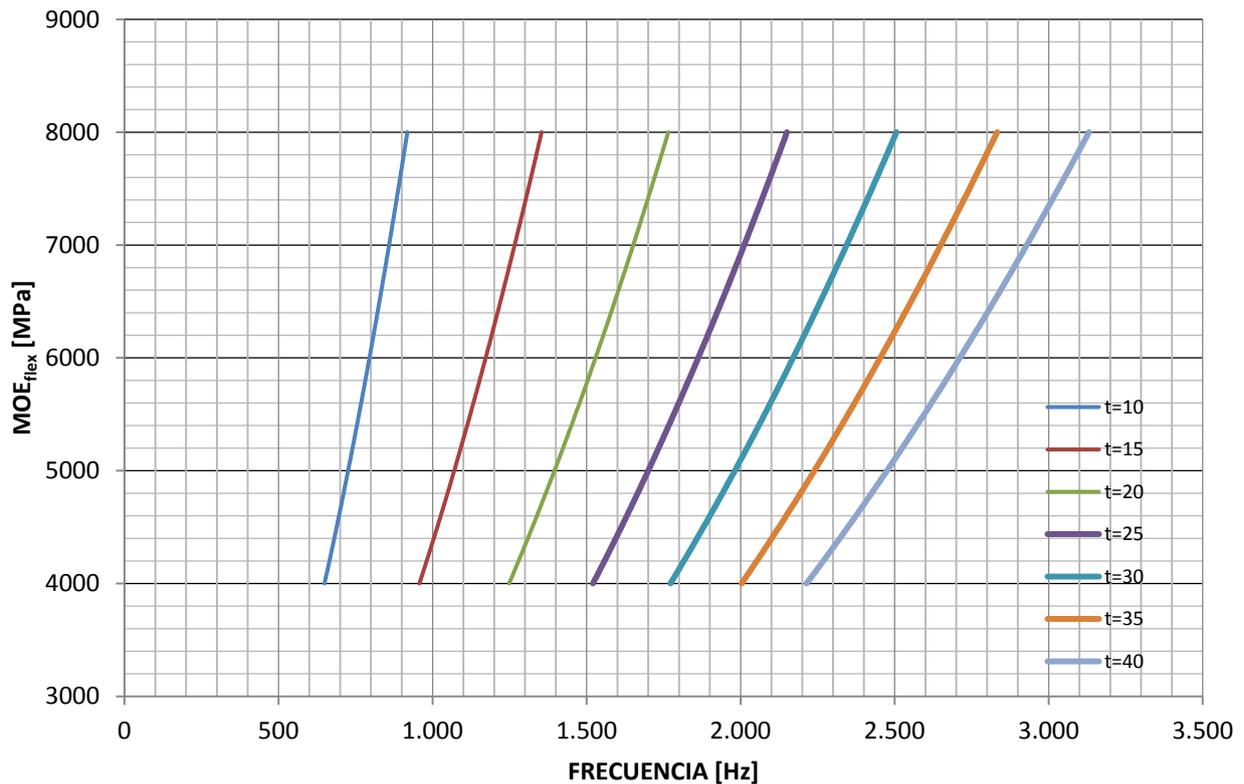


Fig. 4-14 Variación de MOE_{flex} en función de la frecuencia de resonancia y el espesor.

Se hace notar que, tal y como se vio en el capítulo de caracterización del material, en el modo de vibración longitudinal la variación de frecuencias, al variar el ancho de las muestras, es irrelevante.

El espectro de frecuencias para un intervalo esperado de valores del módulo de deformación es mayor al aumentar el espesor de la probeta y, además, a menor espesor frecuencias más bajas.

Este rango varía entre 649 Hz y 918 Hz para espesores de 10 mm y el ya mencionado de 2.214 Hz a 3.131 Hz para un espesor de probeta normalizada de 40 mm. El incremento en el intervalo de frecuencias no es lineal, sino que aumenta al aumentar el espesor.

Una conclusión similar a la expuesta para el modo de vibración longitudinal nos sirve también ahora, si bien hay que entender que en esta ocasión todas las frecuencias están por debajo del límite de 3 kHz, donde la precisión en las mediciones de los acelerómetros modales es mayor.

A la vista de ambas gráficas y considerando el transductor utilizado y las dimensiones de las probetas, resulta más preciso el valor de cálculo del módulo de deformación obtenido para una frecuencia de resonancia en el modo de vibración transversal.

4.5. Módulo de deformación dinámico (MOE).

El procedimiento de ensayo elegido es el propuesto por el fabricante (DIT_plus:543p/09, 2009) y recogido en la norma americana de hormigón (ASTM-C215, 2008) cuya formulación es totalmente coincidente con la simulación realizada por el MEF y cuyos resultados, además, pueden ser comparados con un mayor número de trabajos realizados. No obstante los procedimientos desarrollados para otros materiales como piedra (UNE-EN_14146, 2004) o productos refractarios (UNE-EN_ISO_12680-1, 2007), son sensiblemente parecidos y dan resultados similares a la norma de hormigón utilizada.

Para aportar mejoras operativas en la mecánica de ensayo, dado el número de probetas de que se disponía y la previsión de repetir el procedimiento a diferentes edades al tratarse de un ensayo no destructivo (NDT), se utilizaron dos tipos de acelerómetros piezoeléctricos para captar la vibración sobre las probetas, uno de ellos de tipo uniaxial y el otro de tipo triaxial. Sin embargo, dado que los datos obtenidos con uno y otro no han resultado coincidentes, vamos a proceder en primer lugar a revisarlos y así poner en valor cada uno de ellos.

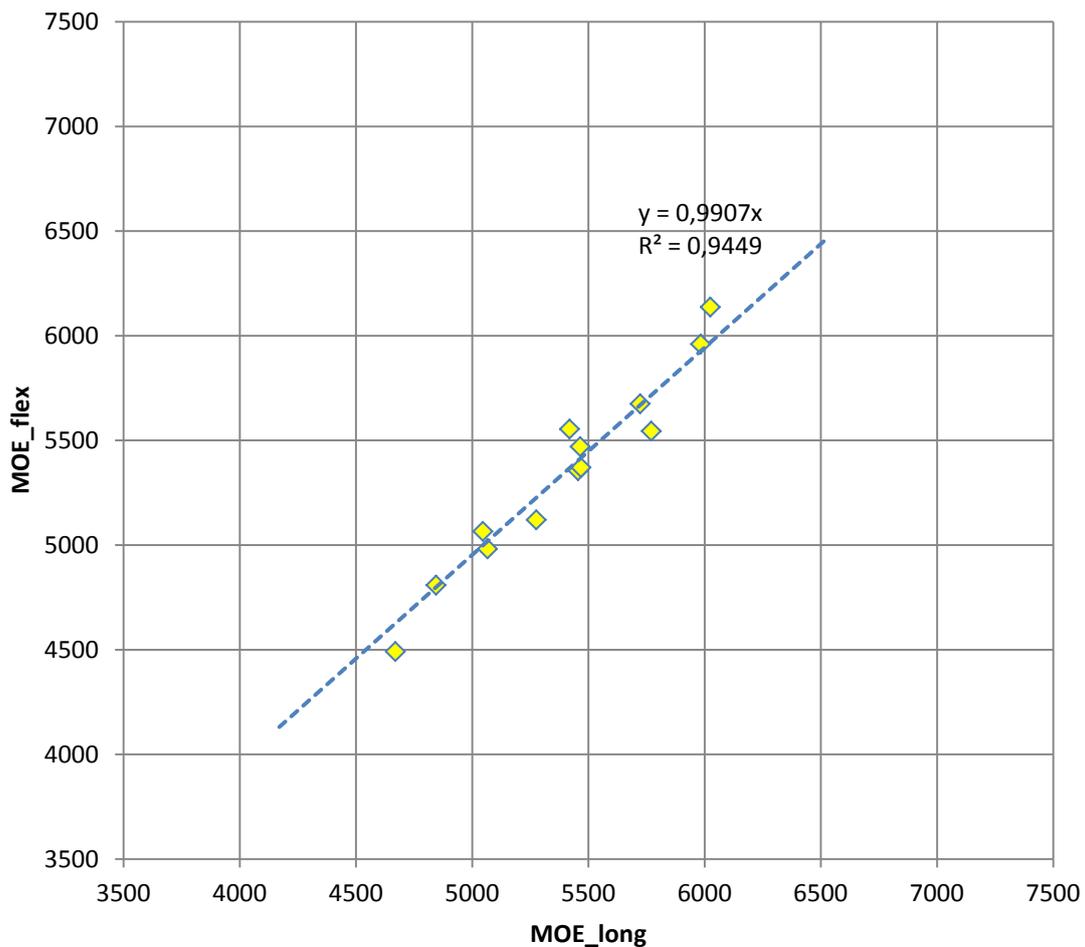


Fig. 4-15 Comparación entre los valores longitudinal y transversal de E_d obtenidos con ensayo uniaxial.

La grafica de la Fig. 4–15 representa los valores del módulo de deformación dinámico calculado, siguiendo la norma ASTM C215, a partir de las frecuencias fundamentales de los modos de vibración longitudinal (Fig. 4–16) y transversal (Fig. 4–17) medidas utilizando un acelerómetro uniaxial. Cada pareja de valores es la media de tres probetas en las que se ha situado el transductor alternativamente en las posiciones que, para cada modo, determina la norma.



Fig. 4–16 Modo longitudinal



Fig. 4–17 Modo transversal.



Fig. 4–18 Modo de torsión.

Los valores de módulo son prácticamente coincidentes para ambos modos de vibración con una pequeña variación inferior al 1% en favor del longitudinal. Por otro lado la correlación entre los datos es buena, con una baja dispersión.

Los datos obtenidos a partir de investigaciones sobre probetas prismáticas de mortero curadas en laboratorio indican una tendencia similar pero con variaciones algo superiores, entre un 5% y un 8% dependiendo de la edad, si bien fueron obtenidos mediante medición de la velocidad de paso de impulsos ultrasónicos (Swamy & Rigby, 1971).

Otros autores han encontrado valores ligeramente superiores, alrededor de un 4%, para el módulo de deformación transversal, pero los ensayos eran sobre probetas cilíndricas (Haach, Carrazedo, Oliveira, & Corrêa, 2013; Popovics, Zemahtis, & Shkolnik, 2008).

El valor medio final para cada uno de ellos fue de **5.401 MPa** para el MOE_{long} y de **5.348 MPa** para el MOE_{flex} , con un coeficiente de variación que no superaron el 8% en los dos casos.

Además, parte de estas muestras se sometieron a impactos adicionales para obtener la frecuencia de resonancia en el modo de torsión (Fig. 4–18) y calcular, conforme al procedimiento descrito en la norma, el módulo de deformación transversal, G . Aplicando la expresión que relación éste con el módulo de Young se obtuvo el coeficiente de Poisson¹ que arrojó un valor de 0,21, acorde con el obtenido para morteros en otros trabajos (Toma, Covatariu, Toma, Taranu, & Budescu, 2013) y habitualmente referenciado en la literatura.

¹ Se necesita el coeficiente de Poisson para poder obtener el módulo de deformación en el modo transversal según el procedimiento detallado en la norma ASTM C215.

La gráfica de la Fig. 4–19 es idéntica a la Fig. 4–15 pero a partir de las frecuencias fundamentales de los modos de vibración longitudinal y transversal recogidas en esta ocasión por el acelerómetro triaxial. Este receptor ofrece la ventaja de obtener ambas frecuencias simplemente cambiando el punto de impacto, sin despegar el acelerómetro, lo cual ofrece ventajas en los tiempos necesarios para realizar los ensayos.

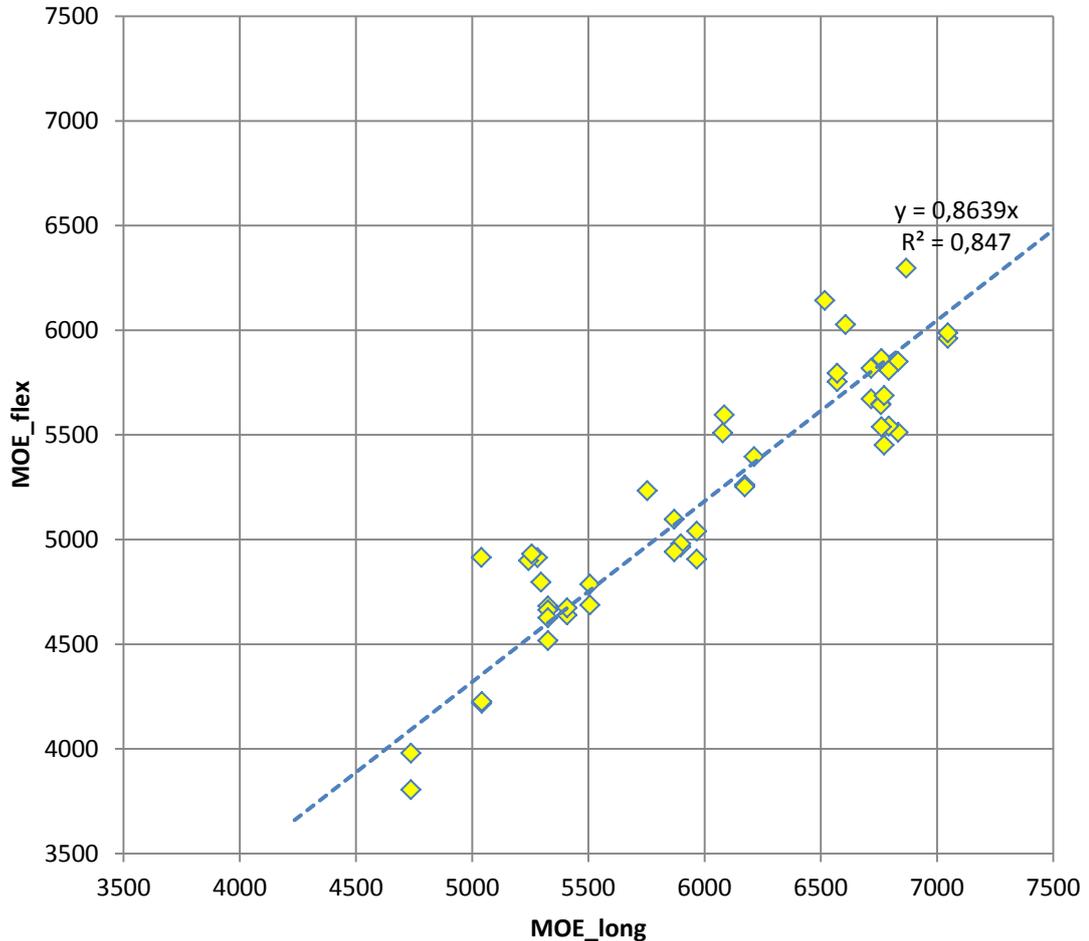


Fig. 4–19 Comparación entre los valores longitudinal y transversal de E_d obtenidos con ensayo triaxial.

En esta ocasión el módulo de deformación longitudinal resultó sensiblemente mayor que el transversal, con una variación cercana al 13%. Además la correlación entre los datos fue algo menor.

Los valores medios obtenidos son de **5.923 MPa** para el MOE_{long} y **5.178 MPa** para el MOE_{flex} , estando los coeficientes de variación de cada uno de ellos muy próximos al 12%.

Otros trabajos proponen utilizar como valor final el promedio de ambos (Rosell & Cantalapiedra, 2011) con lo que obtendríamos un valor para el módulo de deformación dinámico del mortero en el entorno de los **5.500 MPa**, independientemente del transductor utilizado.

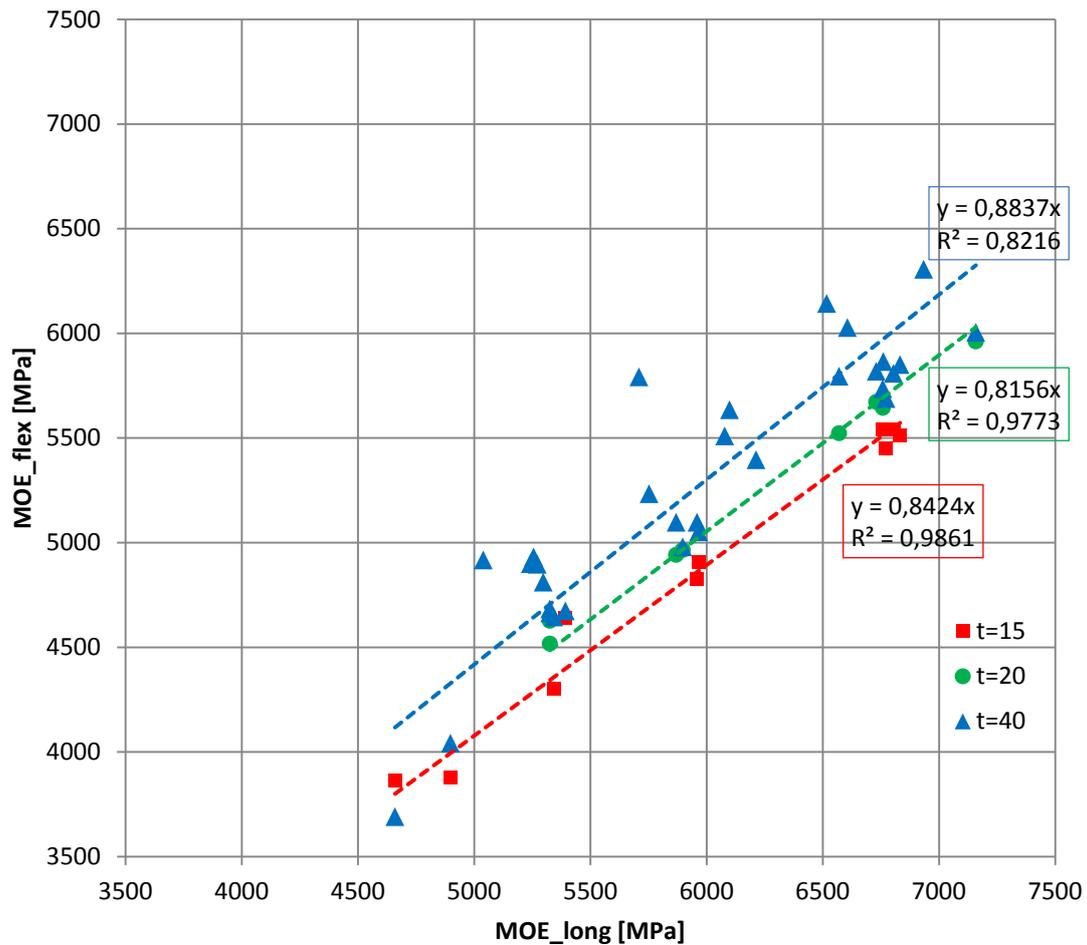


Fig. 4–20 Comparación de módulos dinámicos para diferentes espesores de probetas.

Si desmenuzamos los valores representados en la Fig. 4–19 según el tamaño de las probetas obtenemos la distribución de valores representados en la Fig. 4–20.

Para el cálculo del módulo de deformación en el modo de flexión de esta gráfica se han ensayado las probetas más pequeñas apoyadas sobre la cara más ancha donde presentan menor rigidez.

En esta posición las probetas se excitan a su frecuencia de resonancia más baja que disminuye al disminuir el espesor Fig. 4–14, mientras que la frecuencia de resonancia en el modo longitudinal es sensiblemente igual para todos los casos.

En las gráficas de la Fig. 4–20, podemos ver mayores diferencias entre el módulo de deformación longitudinal y el de flexión a medida que disminuimos el espesor de la probeta, pero no podemos determinar en qué modo se ve afectada por la propia medición de frecuencias en distintos rangos que hemos comentado en el apartado 4.4.

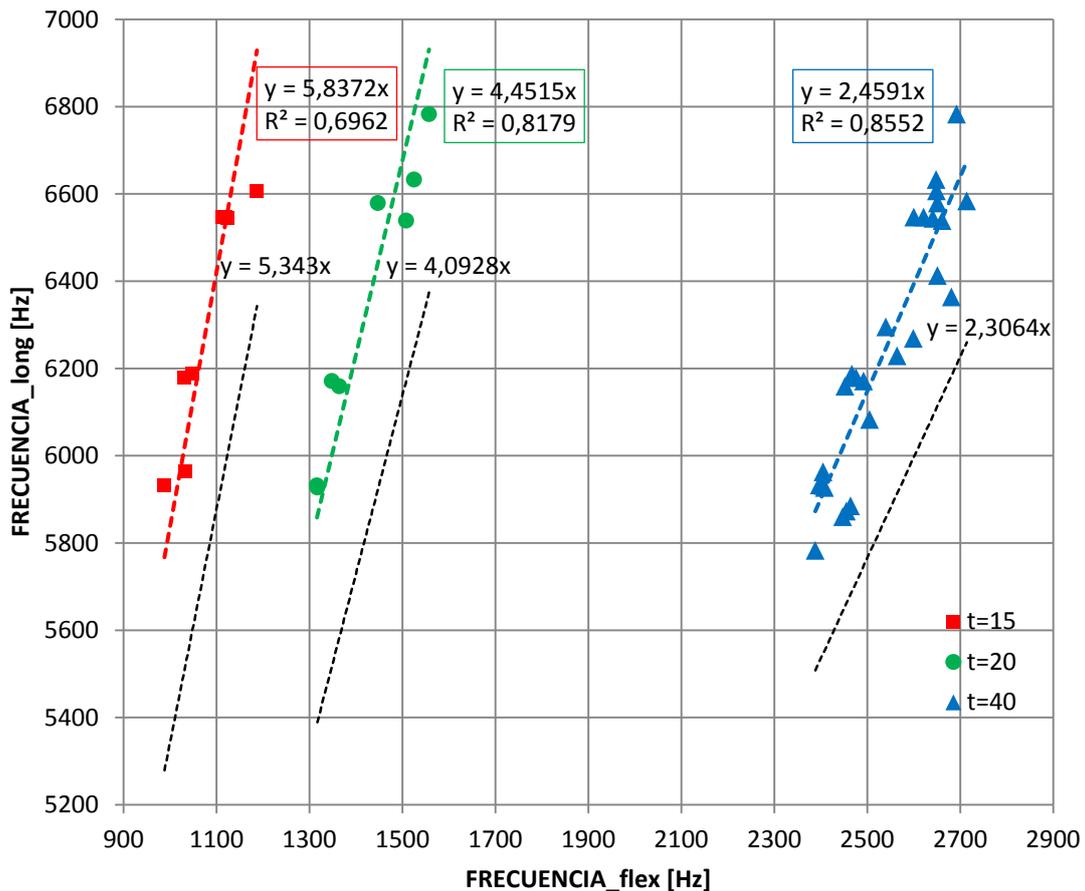


Fig. 4–21 Comparación de frecuencias de resonancia para diferentes espesores de probetas.

La relación de frecuencias de resonancia para probetas prismáticas de formato normalizado 40 x 40 x 160 mm y de formatos en los que se ha variado el espesor, 20 x 40 x 160 mm y 15 x 40 x 160 mm, se muestra en la Fig. 4–21. Las líneas en puntos indican la relación de frecuencias calculadas con el MEF y que indicarían módulos de deformación iguales para los dos modos de vibración.

En la gráfica se dibujan los diferentes rangos de frecuencias obtenidos en el ensayo dinámico para el modo de vibración transversal al variar de nuevo el tamaño de la probeta. Las frecuencias más bajas se corresponden con las probetas más estrechas en las que se han obtenido diferencias mayores entre los módulos de deformación longitudinal y transversal (Fig. 4–20).

Es necesario profundizar en la relación que existe entre el tamaño de las probetas prismáticas, en particular la variación de espesor, el modo de vibración en que son excitadas y la mecánica de ensayo utilizada.

4.5.1. Evolución en el tiempo.

En las condiciones normales de curado en laboratorio, en un cuarto a temperatura y humedad ambiente constantes, el módulo de deformación dinámico, tanto en el modo de vibración longitudinal como en el transversal, tiende a disminuir con la edad como se aprecia en la Fig. 4–22, donde cada valor representa la media de muestras ensayadas a esa edad.

El periodo de tiempo representado en el gráfico abarca desde el primer mes hasta seis meses después de elaboradas las muestras. Durante este tiempo el módulo de Young dinámico disminuyó entre un 13% y un 22% dependiendo del modo de vibración utilizado para su cálculo. Además se aprecia un periodo crítico en su evolución entre los 84 y los 105 días.

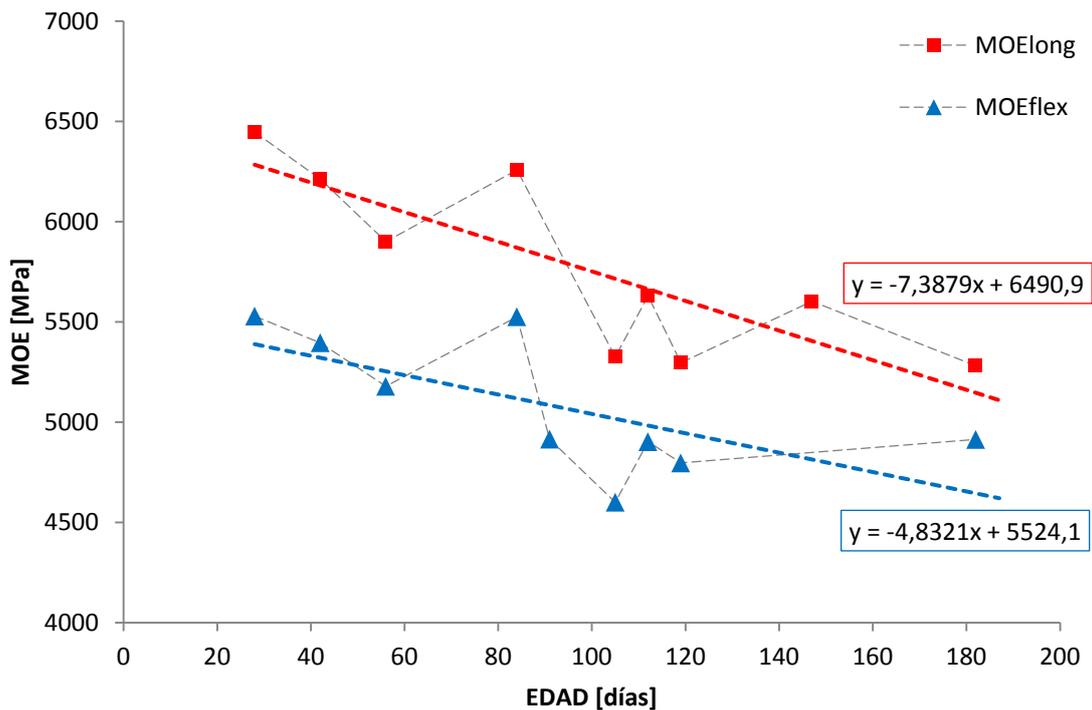


Fig. 4–22 Evolución de los módulos de deformación dinámicos para los modos longitudinal y de flexión.

Por los argumentos ya expuestos, esta tendencia se relaciona, al igual que en el caso de las resistencias, con la reducción en el contenido de humedad y los cambios en la microestructura interna (Eiras, Popovics, Borrachero, Monzó, & Payá, 2015). La pérdida del agua ocluida en la estructura de poros del sistema relaja la presión hidrostática y conduce a una disminución en el módulo de elasticidad del mortero que se acentúa con la fisuración por retracción que experimenta la probeta con el secado.

Además esta fisuración parece afectar en mayor medida a la medición de la frecuencia transversal, posiblemente porque las fisuras tienden a formarse preferentemente en esta dirección (Grassl, Wong, & Buenfeld, 2010).

A medida que las probetas van perdiendo el agua interna por evaporación a través de la red capilar, la estructura porosa del material se hace más evidente y, en consecuencia, los valores

de densidad disminuyen y arrastran a la baja a la resistencia y al módulo de deformación (Yaman, Hearn, & Aktan, 2002). También el uso de aditivos, siempre que influyan en el contenido de agua, se ha relacionado con la disminución del módulo de deformación dinámico (Swamy & Rigby, 1971). De hecho, una de las principales complicaciones de modelado de sistemas cementosos es que su estructura está influenciada por el contenido de humedad de los poros, que inevitablemente influye en sus propiedades mecánicas (Yaman et al., 2002).

Esta disminución de las propiedades elásticas determina para las muestras extraídas del mortero puesto en obra un valor del MOE_{long} y del MOE_{flex} de 4.890 MPa y de 4.160 MPa respectivamente, aproximadamente 1.000 MPa menos que las muestras elaboradas en el laboratorio, lo cual supone variaciones del 24% y el 29% respecto del valor a 28 días. En este valor no se ha cuantificado la pérdida de resistencias provocada por los daños causados en los estratos superficiales por la extracción y corte de las probetas.

Sobre parte de estas mismas probetas se hicieron mediciones de frecuencia utilizando el acelerómetro uniaxial que arrojó valores de MOE_{long} un 10% mayores.

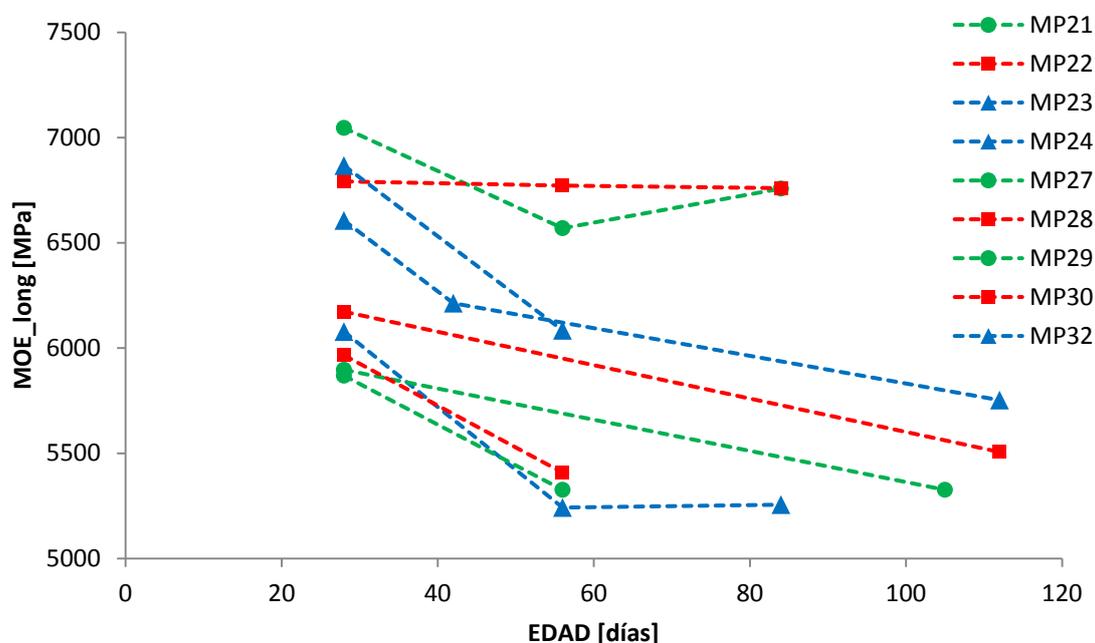


Fig. 4-23 Evolución del MOE longitudinal para cada muestra.

Finalmente se ha representado el comportamiento del módulo de deformación dinámico en el modo longitudinal para cada muestra analizada, Fig. 4-23, donde cada valor se corresponde con tres probetas ensayadas y la forma y el color diferencian distintos anchos de probeta, triángulo azul 40 mm, círculo verde 20 mm y cuadrado rojo 15 mm.

Se aprecia una disminución más acusada durante las primeras semanas de curado y una evolución más compensada a partir de los dos meses de edad. Detrás de este comportamiento sigue estando la pérdida del agua interna debida al secado de las muestras que evoluciona de una forma más rápida durante las primeras semanas aumentando la porosidad (Chen et al., 2013).

4.5.2. Relación entre el módulo de deformación y la resistencia.

El módulo de deformación, tanto estático como dinámico, aumenta al aumentar la resistencia (Fig. 4–24), ahora bien, teniendo en cuenta la heterogeneidad natural del mortero, esta relación es mucho más compleja de lo que sugieren las gráficas y restringida a cada tipo de composición en particular (Boumiz, Vernet, & Cohen Tenoudji, 1996).

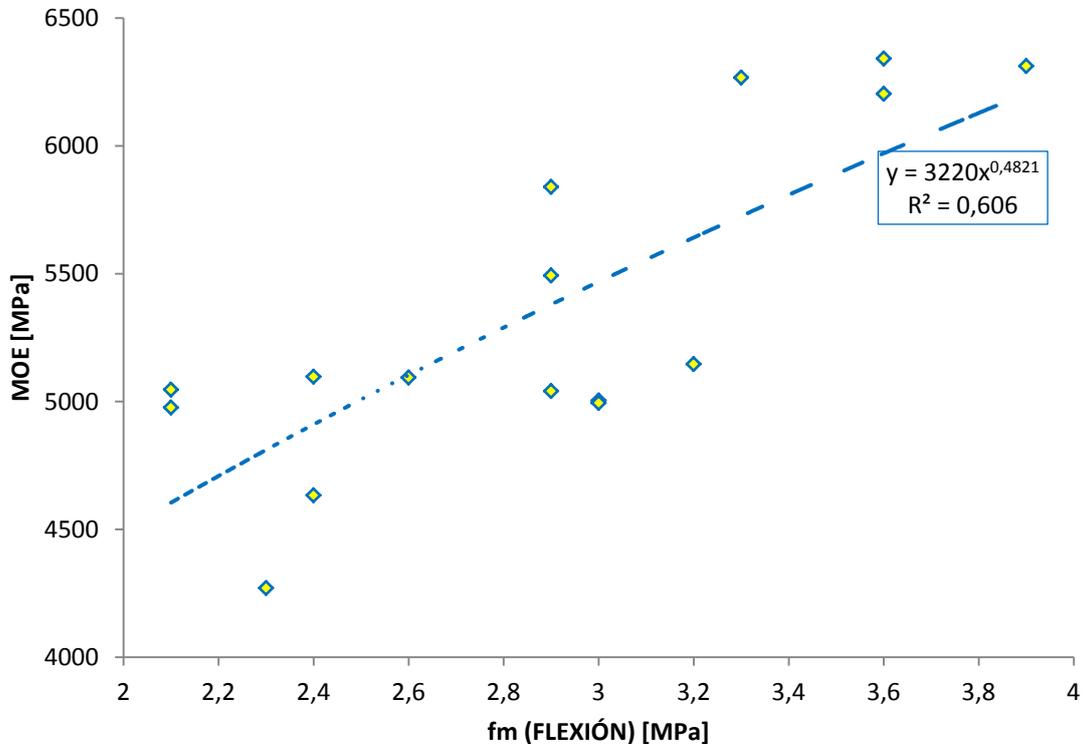


Fig. 4–24 Relación entre el módulo de deformación dinámico y la resistencia a flexión del mortero.

En este apartado se hacen varias comparaciones. La primera de ellas, entre la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad dinámico (Fig. 4–24), se ajusta a una regresión potencial con un exponente 0,4821 próximo a la raíz cuadrada de la resistencia, es decir,

$$E_{m,d} = 3.220 \sqrt{f_{m,t}} \text{ [MPa]}$$

En la segunda, esta vez utilizando la resistencia a compresión (Fig. 4–25), la relación más ajustada se ha obtenido con una regresión lineal, o lo que es igual con exponente unidad, para la comparación con el módulo de deformación dinámico,

$$E_{m,d} = 758 f_{m,c} \text{ [MPa]}$$

mientras que el estático se ha expresado como función de la resistencia a compresión elevada a 0,6562, es decir,

$$E_{m,s} = 1.406 f_{m,c}^{2/3} \text{ [MPa]}$$

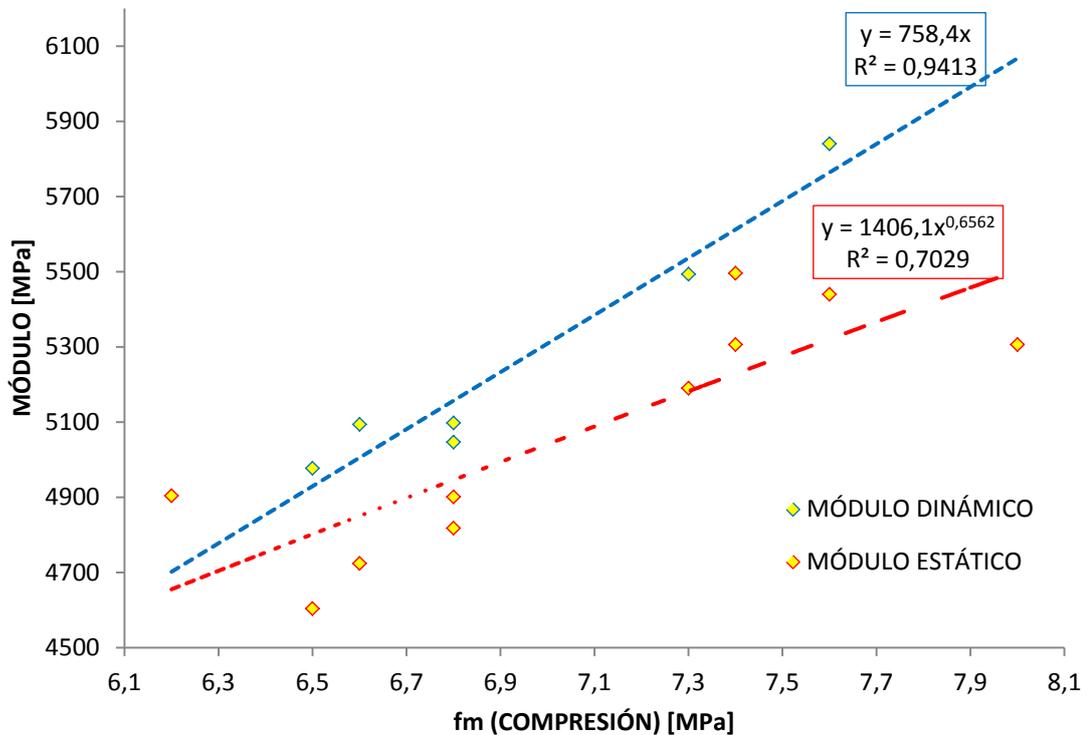


Fig. 4-25 Relación entre el módulo de deformación y la resistencia a compresión.

No hay una única característica del mortero (dosificación, relación a/c, tipo de árido, etc...) que influya por igual en la resistencia y el módulo de deformación, e incluso se producen variaciones dependiendo del procedimiento de ensayo elegido (Swamy & Rigby, 1971) o de su evolución en el tiempo. En nuestro caso el mortero utilizado se presume el mismo para todas las probetas, pero hay que tener en cuenta que en los gráficos que se muestran en este apartado se han utilizado datos tomados de ensayos a diferentes edades.

Podemos concluir que en un caso la relación es lineal y en los otros dos se aproxima, hecho previsible al tratarse del mismo mortero donde hay un gran número de variables que no se alteran entre las muestras. El mejor ajuste se produce entre la resistencia a compresión y el módulo de deformación dinámico y además este es mayor que el estático, diferencia que aumenta al aumentar la resistencia a compresión del mortero.

4.5.3. Relación entre módulo de deformación estático y dinámico.

Desde los primeros ensayos es un hecho comúnmente establecido para el hormigón, y extensible también para el mortero, que el módulo de deformación dinámico es mayor que el estático (Goldsmith, Polivka, & Yang, 1966) y que dicha diferencia depende del tamaño y forma de la probeta, de la edad y de su magnitud (Popovics et al., 2008) y también del tipo de procedimiento utilizado ya que los ensayos estáticos tienen importantes desviaciones debidas al centrado de la carga o la colocación de las galgas. La diferencias pueden llegar a ser del 17% (Popovics et al., 2008; Rosell & Cantalapiedra, 2011; Swamy & Rigby, 1971).

En la Fig. 4–26 se han comparado los valores del módulo de deformación estático bajo compresión con el módulo de deformación dinámico para las series de probetas normalizadas de las que se tienen datos conjuntos (MP10, MP15, MP16, MP23, MP24 y MP32), resultando,

$$E_{m,s} = 0,94 E_{m,d}$$

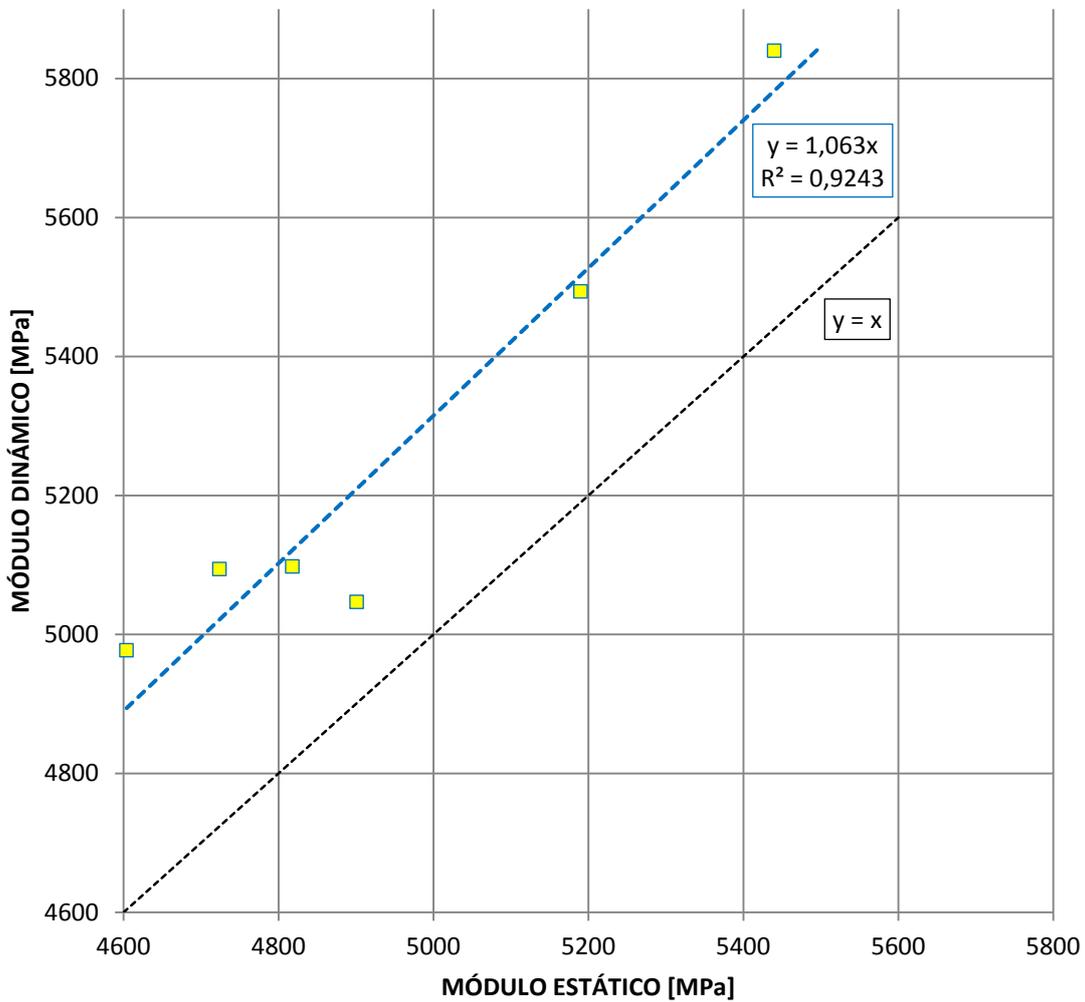


Fig. 4–26 Comparación entre el módulo de deformación estático y dinámico.

4.5.4. Efecto tamaño.

La teoría del efecto del tamaño aplica principios estadísticos al atribuir el aumento de la resistencia de una estructura a la aleatoriedad del valor de la resistencia del material debido a su falta de homogeneidad. Por lo tanto, la probabilidad de encontrar un pequeño defecto de resistencia aumenta con el tamaño de la muestra.

De la teoría presentada anteriormente se hace obvio que esta investigación puede esperar que la resistencia a la flexión de especímenes de tamaño no estándar sea mayor que la de muestra de tamaño estándar más grandes.

Por este motivo en la Fig. 4-27 se ha representado la evolución de dicha resistencia a flexión (UNE-EN_1015-11, 2000), que además es la única de la que tenemos valores para todos los espesores de probetas ensayados de 15 mm, 20 mm y 40 mm.

Se ha encontrado que efectivamente se produce un aumento de la resistencia del mortero a medida que varía el ancho de la probeta. Además de la pérdida de resistencia en el tiempo ya conocida se constata un aumento de su valor de un 18% a un 25% respecto al tamaño normalizado para anchos de 20 mm y 15 mm respectivamente.

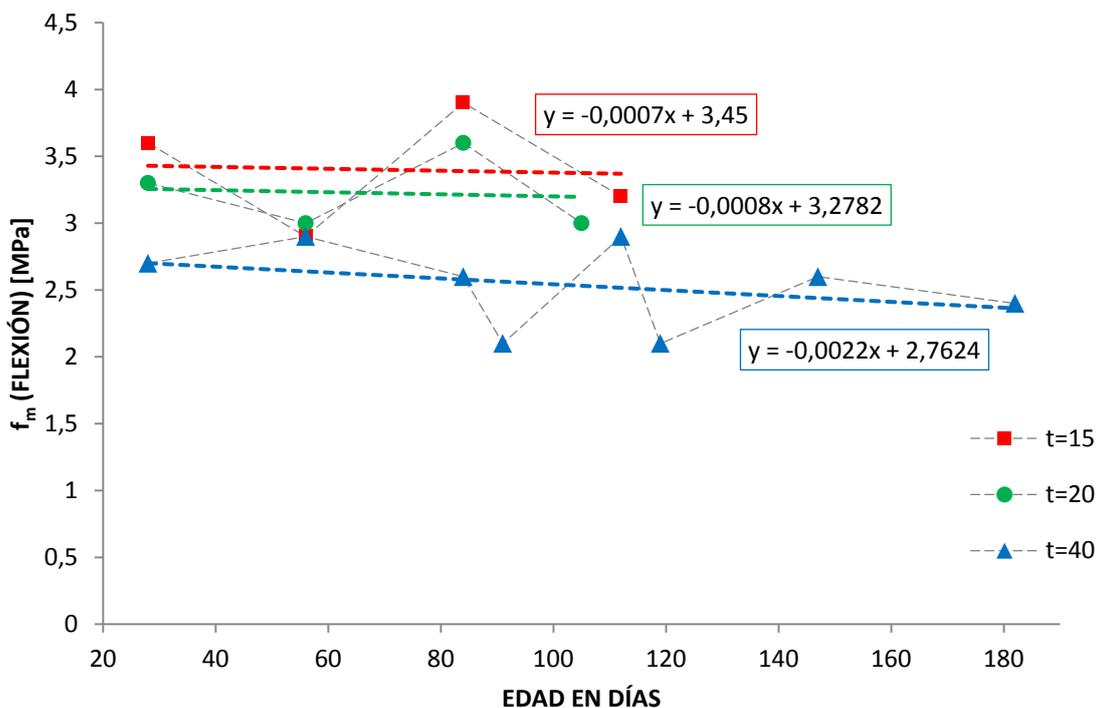


Fig. 4-27 Evolución de la resistencia a flexotracción en función del tamaño de la probeta.

Por su parte, en la Fig. 4-28 se ha representado la evolución, en función del tiempo de curado, del módulo de Young dinámico calculado a partir de la frecuencia de resonancia en el modo de vibración longitudinal, también para todos los espesores de probetas ensayados de 15 mm, 20 mm y 40 mm.

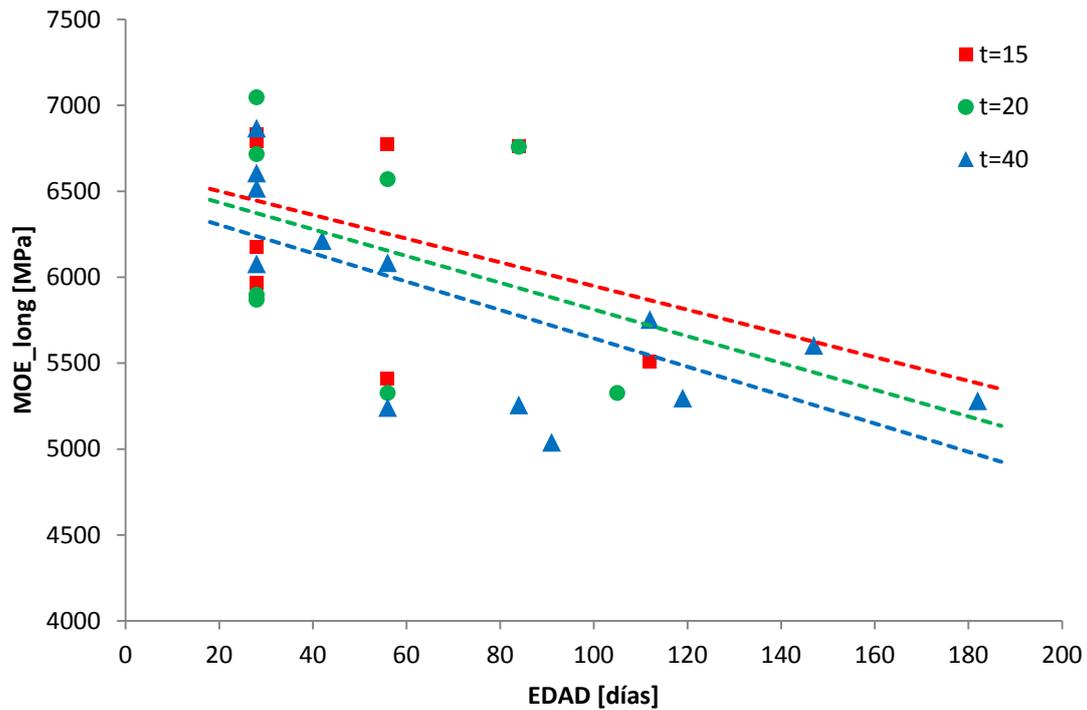


Fig. 4-28 Evolución del MOE longitudinal en función del ancho de la probeta.

Una de las conclusiones extraídas del análisis numérico es que la frecuencia de vibración fundamental en el modo longitudinal, con la que se calcula el MOE_{long} representado, es sensiblemente igual para cada uno de los espesores mencionados y, por lo tanto, su representación en el gráfico debería coincidir.

Sin embargo, dentro de la tendencia general a disminuir con el tiempo, se aprecian diferencias en el valor del módulo en función del tamaño de la muestra, de forma que dicho valor se incrementa a medida que disminuye el ancho de la probeta. Para el ancho de 20 mm el incremento es del 6% con respecto al formato normalizado, mientras que para las probetas de 15 mm de ancho el aumento en el módulo de deformación se acerca al 8%.

Siempre hay un efecto probabilístico sobre las investigaciones del efecto de tamaño en forma de variación al azar. En todo caso, puede carecer de significado estadístico aplicar a las muestras de menor tamaño las mismas pruebas que se aplican a los formatos estándar (Drdácký, 2011).

Se ha valorado esta posibilidad en los ensayos estáticos donde a la banda extensiométrica en la cara inferior se la suponía trabajando a modo de refuerzo en flexión, lo cual provocaría la obtención de mayores tensiones para probetas más pequeñas. Paralelamente, en el ensayo de vibración por impacto puede estar incidiendo el mayor peso relativo de los transductores de contacto a medida que disminuye el tamaño de la probeta, lo que aumentaría su densidad y el módulo calculado.

4.6. Coeficiente de Poisson, ν .

Dentro del procedimiento seguido para la determinación del módulo de deformación dinámico (ASTM-C215, 2008), es necesario estimar un valor del coeficiente de Poisson para determinar el MOE en el modo de vibración transversal.

Diferentes y muy amplios trabajos proponen un valor para esta constante que, en el caso más habitual del hormigón, varía entre 1/6 y 1/3 (Picket, 1945) y para el mortero tiene valores en torno a 0,20 calculado tanto en ensayos estáticos (Toma et al., 2013) como dinámicos (Valentini et al., 2014).

No obstante el procedimiento utilizado permite determinarla midiendo la frecuencia de resonancia en el modo de vibración de torsión y hallando el módulo de cizalladura. Con este valor y el módulo de Young calculado a partir del modo de vibración longitudinal, se determina de forma precisa el coeficiente de Poisson.

En la práctica supone disponer el acelerómetro en la posición correspondiente al modo de torsión, lo cual implica un nuevo ensayo que no se ha considerado necesario repetir para todas las probetas analizadas, dada la pequeña variación esperada dentro de un conjunto de muestras tan homogéneo (Toma et al., 2013).

Muestra	Edad(d)	t(mm)	b(mm)	Frecuencia _{long}	MOE _{long}	Frecuencia _{tors}	G	Poisson
MP10B	182	40	40	6068	5723	3584	2374	0,21
MP24	56	40	40	5999	5468	3541	2255	0,21
MP24	84	40	40	6004	5465	3548	2258	0,21
MP32	56	40	40	6220	6025	3675	2488	0,21
MP32	112	40	40	6191	5983	3648	2458	0,22
E1	1000	15	40	6144	5771	2244	2408	0,20
F1	1000	15	40	5932	5276	2416	2174	0,21

Tabla 4–1 Cálculo del coeficiente de Poisson

En la Tabla 4–1 se aprecia el resultado completo del cálculo. Se han realizado ensayos de dos muestras (MP24 y MP32) a diferentes edades, donde cada valor se ha tomado como media de tres probetas. También se han ensayado otras tres probetas de forma individual (MP10, E1 y F1), donde las dos últimas pertenecen a mortero extraído in situ.

Se ha obtenido un valor del coeficiente de Poisson muy constante para todas las probetas ($\nu=0,21$), salvo una muy ligera disminución en una de las probetas obtenidas de la obra para la que se ha supuesto una edad aproximada de tres años.

Este valor, finalmente, ha sido utilizado para calcular el módulo de deformación dinámico en el modo de vibración transversal, sin la incertidumbre que supone su estimación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM-C215. (2008). Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens. *Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials*.
- Boumiz, A., Vernet, C., & Cohen Tenoudji, F. (1996). Mechanical properties of cement pastes and mortars at early ages. *Advanced Cement Based Materials*, 3(3-4), 94-106. doi: 10.1016/1065-7355(95)00072-0
- Chen, X., Wu, S., & Zhou, J. (2013). Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 40, 869-874. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.072
- DIT_plus:543p/09. (2009). Documento de Idoneidad Técnica plus: N.º 543p/09. Morteo monocapa para revestimiento de fachadas ONEXIT MONOCAPA UNIVERSAL. *Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja*.
- Drdácký, M. (2011). Non-standard testing of mechanical characteristics of historic mortars. *International Journal of Architectural Heritage*, 5(4-5), 383-394. doi: 10.1080/15583051003717788
- Eiras, J. N., Popovics, J. S., Borrachero, M. V., Monzó, J., & Payá, J. (2015). The effects of moisture and micro-structural modifications in drying mortars on vibration-based NDT methods. *Construction and Building Materials*, 94, 565-571. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.078
- Esteves, L. P., Cachim, P., & Ferreira, V. M. (2007). *Mechanical properties of cement mortars with superabsorbent polymers*. Paper presented at the Advances in Construction Materials 2007.
- Goldsmith, W., Polivka, M., & Yang, T. (1966). Dynamic behavior of concrete. *Experimental Mechanics*, 6(2), 65-79. doi: 10.1007/BF02326224
- Grassl, P., Wong, H. S., & Buenfeld, N. R. (2010). Influence of aggregate size and volume fraction on shrinkage induced micro-cracking of concrete and mortar. *Cement and Concrete Research*, 40(1), 85-93. doi: 10.1016/j.cemconres.2009.09.012
- Haach, V. G., Carrazedo, R., Oliveira, L. M. F., & Corrêa, M. R. S. (2013). Application of acoustic tests to mechanical characterization of masonry mortars. *NDT and E International*, 59, 18-24. doi: 10.1016/j.ndteint.2013.04.013
- Paiva, H., Esteves, L. P., Cachim, P. B., & Ferreira, V. M. (2009). Rheology and hardened properties of single-coat render mortars with different types of water retaining agents. *Construction and Building Materials*, 23(2), 1141-1146. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.06.001
- Picket, G. (1945). Equations for Computing Elastic Constants from Flexural and Torsional Resonant Frequencies of Vibration of Prisms and Cylinders. *Proceedings of the American Society for Testing and Materials. Portland Cement Association, Vol. 45*, 846-865.
- Popovics, Jonh S., Zemajtis, J., & Shkolnik, I. (2008). A study of static and dynamic modulus of elasticity of concrete.
- Rosell, J. R., & Cantalapiedra, I. R. (2011). Simple method of dynamic Young's modulus determination in lime and cement mortars. *Materiales de Construcción*, 61(301), 39-48. doi: 10.3989/mc.2010.53509
- Swamy, N., & Rigby, G. (1971). Dynamic properties of hardened paste, mortar and concrete. *Matériaux et Constructions*, 4(1), 13-40. doi: 10.1007/BF02473927

- Toma, I. O., Covatariu, D., Toma, A. M., Taranu, G., & Budescu, M. (2013). Strength and elastic properties of mortars with various percentages of environmentally sustainable mineral binder. *Construction and Building Materials*, 43, 348-361. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.061
- UNE-EN_1015-2. (1999). Método de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 2: Toma de muestras total de morteros y preparación de los morteros para ensayo. *AENOR*.
- UNE-EN_1015-11. (2000). Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido. *AENOR*.
- UNE-EN_1352. (1997). Determinación del módulo de elasticidad estática bajo compresión del hormigón curado en autoclave o de áridos ligeros con estructura abierta. *AENOR*.
- UNE-EN_14146. (2004). Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del módulo de elasticidad dinámico (con la medida de la frecuencia de resonancia fundamental). *AENOR*.
- UNE-EN_ISO_12680-1. (2007). Métodos de ensayo para productos refractarios. Parte 1: Determinación del módulo de Young dinámico (MOE) por excitación de la vibración por impulso. *AENOR*.
- Valentini, L., Parisatto, M., Russo, V., Ferrari, G., Bullard, J. W., Angel, R. J., . . . Artioli, G. (2014). Simulation of the hydration kinetics and elastic moduli of cement mortars by microstructural modelling. *Cement and Concrete Composites*, 52, 54-63. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.05.005
- Yaman, I. O., Hearn, N., & Aktan, H. M. (2002). Active and non-active porosity in concrete. Part I: Experimental evidence. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 34(246), 102-109.
- Yurtdas, I., Peng, H., Burlion, N., & Skoczylas, F. (2006). Influences of water by cement ratio on mechanical properties of mortars submitted to drying. *Cement and Concrete Research*, 36(7), 1286-1293. doi: 10.1016/j.cemconres.2005.12.015

Conclusiones.

El alcance de este trabajo ha sido determinar el módulo de elasticidad de un mortero de revestimiento puesto en obra mediante una vibración por impacto. Se presenta una tecnología simple, precisa y fiable para determinar las constantes elásticas dinámicas a partir de las frecuencias naturales de vibración.

Se han podido extraer las siguientes conclusiones:

1. El procedimiento propuesto por la norma (ASTM-C215, 2008) permite conservar las probetas (ensayo no destructivo) y ha podido ser repetido con relativa simplicidad. Además se puede utilizar para predecir con precisión las constantes elásticas del material (E , G y ν) en probetas prismáticas de distintos formatos. Siguiendo su formulación se ha obtenido un valor ajustado de $E_m = 5.500 \text{ MPa}$, para el mortero bajo las condiciones de ensayo fijadas en el laboratorio y se ha constatado una disminución de su valor con la edad. El coeficiente de Poisson obtenido $\nu = 0,21$ se sitúa en línea con el valor mencionado en la literatura.
2. El módulo de deformación así calculado se ha comparado satisfactoriamente con el obtenido para el mismo material mediante un ensayo estático (UNE-EN_1352, 1997) con probetas de formato normalizado 40 x 40 x 160 mm. Los resultados indican que ambos módulos evolucionan por igual y han podido ser relacionados fácilmente $E_{m,s} = 0,94 E_{m,d}$, con las consiguientes ventajas prácticas.
3. Los ensayos efectuados en el laboratorio a muestras de mortero de revestimiento obtenidas *in situ* indican valores del módulo de deformación de 4.500 MPa dentro de la evolución esperada. Los testigos, con espesores variables comprendidos entre 10 y 20 mm, se ajustan muy bien a un ensayo de obtención de la frecuencia de resonancia fundamental mediante el método de vibración por impacto, si bien los resultados se han visto condicionados por sus menores dimensiones con un aumento en los valores de resistencia y módulo de deformación dinámico. Sin embargo, no ha sido posible obtener el módulo de deformación aplicando un ensayo estático a estas muestras de mortero obtenidas *in situ* porque los espesores habituales para revestimiento de fachada no lo permiten.

4. Por último se ha constatado la utilidad de disponer previamente de una simulación numérica utilizando una herramienta de análisis de elementos finitos para poder identificar correctamente las frecuencias asociadas a cada modo de vibración y evitar errores en su evaluación durante los ensayos.

Para completar el estudio se han realizado ensayos de determinación de la resistencia a flexión y compresión del mortero a distintas edades y con diferentes tamaños de probeta (UNE-EN_1015-11, 2000) obteniéndose valores medios a 28 días de 2,7 MPa y de 7,4 MPa respectivamente con una tendencia a disminuir en el tiempo y, a partir de una sencilla regresión lineal, se han relacionado ambas con una ecuación que presenta un coeficiente de determinación $R^2=0,93$ que indica un buen ajuste. Además se ha podido obtener la gráfica tensión-deformación del mortero a partir de los datos recogidos en este ensayo y comprobar como el material desarrolla un gran tramo elástico sin apenas zona plástica previa a la rotura, confirmando un comportamiento *cuasi frágil*. Los valores del $E_{m,s}$ calculados a partir de estas gráficas confirman una excelente correlación hasta casi la tensión de rotura, sobre todo con el material trabajando a compresión.

Por el contrario, resulta difícil obtener expresiones que puedan permitirnos determinar el módulo de deformación de un mortero. Aun prescindiendo de parámetros relacionados con la composición o dosificación, como la relación agua/cemento o el tamaño y tipo de árido, hay limitaciones debidas a los procedimientos de ensayo. La heterogeneidad del material provoca una respuesta no lineal ante distintos estados de carga que determina una mayor dispersión de los ensayos estáticos. Los ensayos dinámicos no presentan este inconveniente pero también son sensibles al modo de vibración utilizado para su cálculo y el tipo de transductor elegido.

Los valores calculados para el MOE_{long} y el MOE_{flex} han arrojado números mayores para el primero que para el segundo, si bien cuando se ha medido la respuesta con un acelerómetro uniaxial estas diferencias han sido muy pequeñas, de 5401 MPa a 5.348 MPa.

Se han propuesto varias expresiones exponenciales para relacionar el módulo de deformación, tanto estático como dinámico, con las resistencias a tracción y a compresión con buenos resultados. Para el caso concreto del MOE y la resistencia a compresión uniaxial la relación encontrada es lineal con un coeficiente de determinación $R^2=0,94$ que indica un excelente ajuste.

Finalmente se ha puesto de manifiesto la ausencia de estudios sobre el módulo de deformación dinámico no solo para el caso de un mortero de revestimiento sino también para el propio hormigón. Su estimación a partir de datos de ensayos estáticos puede conducir a errores importantes.

Futuras líneas de investigación.

Como continuación de los trabajos realizados se proponen las siguientes líneas de investigación a desarrollar en un futuro:

1. Se han podido valorar los inconvenientes que tiene la extracción de especímenes *in situ* de mortero, al provocar daños en el material debido a la manipulación, que pueden llegar a alterar los resultados de los ensayos. En este sentido sería una ventaja poder determinar el módulo de deformación del mortero dentro de una muestra compuesta por dos materiales en la que se incluiría el soporte extraído conjuntamente con el revestimiento, evitando al mínimo la intervención sobre las muestras.
2. Las frecuencias de excitación en el modo longitudinal de las probetas de formato normalizado son del orden de tres o cuatro veces las obtenidas para el modo transversal por lo que es necesario comprobar la adecuación de los transductores al procedimiento de ensayo dinámico, en particular precisar si el rango de frecuencias influye en la exactitud de los valores medidos. Otra posibilidad, fácilmente evaluable a partir del modelo numérico, es disponer de un tamaño de probeta con frecuencias de resonancia en los modos de vibración longitudinal y de flexión en rangos más próximos que evitase medir en frecuencias altas. Las pruebas preliminares realizadas a las muestras utilizadas para el ensayo de retracción han sido prometedoras en esta dirección, así como los ensayos realizados sobre probetas cilíndricas.
3. También se está considerando la posibilidad de aplicar esta técnica a otros morteros distintos de los de revestimiento, mezclas con polímeros, etc. en colaboración con el departamento de Construcciones Arquitectónicas.

Bibliografía.

- ACI_363R-92. (1992). State-of-the-art report on high-strength concrete. *American Concrete Institute Committee 363*.
- ASTM-C215. (2008). Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens. *Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials*.
- ASTM-C469. (2010). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. *Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials*.
- ASTM-C1198-09. (2013). Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for Advanced Ceramics by Sonic Resonance. *Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials*.
- Atiş, C. D., Kiliç, A., & Sevim, U. K. (2004). Strength and shrinkage properties of mortar containing a nonstandard high-calcium fly ash. *Cement and Concrete Research, 34*(1), 99-102. doi: 10.1016/S0008-8846(03)00247-3
- Bažant, Z. P., & Oh, B. H. (1983). Crack band theory for fracture of concrete. *Matériaux et Constructions, 16*(3), 155-177. doi: 10.1007/BF02486267
- Bažant, Z. P., & Planas, J. (1998). *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials*.
- Bentur, A., & Mitchell, D. (2008). Material performance lessons. *Cement and Concrete Research, 38*(2), 259-272. doi: 10.1016/j.cemconres.2007.09.009
- Bisschop, J., & Van Mier, J. G. M. (2002). Effect of aggregates on drying shrinkage microcracking in cement-based composites. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions, 35*(252 SPEC.), 453-461.
- Boffill, Y., Blanco, H., Lombillo, I., Villegas, L., & Thomas, C. (2014). Caracterización física y mecánica de los morteros de cal utilizados en la rehabilitación de edificios históricos por medio de ensayos no destructivos. *Congreso Latinoamericano REHABEND 2014*.
- Boumiz, A., Vernet, C., & Cohen Tenoudji, F. (1996). Mechanical properties of cement pastes and mortars at early ages. *Advanced Cement Based Materials, 3*(3-4), 94-106. doi: 10.1016/1065-7355(95)00072-0
- BS_5628-1. (1992). Code of Practice for Use of Masonry: Part 1: Structural Use of Unreinforced Masonry. *British Standard*.

- BS_8110-85. (1985). Structural use of concrete. Part 2: Code of practice for special circumstances. *British Standard*.
- Capener, J. C. M. (2006). *Effect of admixtures on the fresh and hardened properties of modern rendering systems*. Paper presented at the Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting - Proceedings of the International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR 2005.
- Capener, J. C. M. (2009). *Properties of modern rendering systems based on mineral binders modified by organic admixtures*. Paper presented at the Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II - Proceedings of the 2nd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR.
- Casali, Ricardo A., Caravaca, Maria A., Acevedo, Carolina, Miño, Julio C., Bizzotto, Marcela, & Torra, Roberto. (2007). Predicción de la resistencia a la compresión y determinación de propiedades estructurales a partir de ensayos no destructivos. *IV Conferencia Panamericana de END*.
- Chen, X., Wu, S., & Zhou, J. (2013). Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 40, 869-874. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.072
- Cheng, C. c., & Sansalone, M. (1995). Determining the minimum crack width that can be detected using the impact-echo method Part 1: Experimental study. *Materials and Structures*, 28(2), 74-82. doi: 10.1007/BF02473174
- Chindapasirt, P., Chareerat, T., & Sirivivatnanon, V. (2007). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 29(3), 224-229. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.11.002>
- Chindapasirt, P., Homwuttiwong, S., & Sirivivatnanon, V. (2004). Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. *Cement and Concrete Research*, 34(7), 1087-1092. doi: 10.1016/j.cemconres.2003.11.021
- Deniz, S., & Erdoğan, S. T. (2015). Prediction of elastic moduli development of cement mortars using early age measurements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(1). doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001025
- DIT_plus:543p/09. (2009). Documento de Idoneidad Técnica plus: N.º 543p/09. Morteo monocapa para revestimiento de fachadas ONEXIT MONOCAPA UNIVERSAL. *Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja*.
- Drdácký, M. (2011). Non-standard testing of mechanical characteristics of historic mortars. *International Journal of Architectural Heritage*, 5(4-5), 383-394. doi: 10.1080/15583051003717788
- Eiras, J. N., Popovics, J. S., Borrachero, M. V., Monzó, J., & Payá, J. (2015). The effects of moisture and micro-structural modifications in drying mortars on vibration-based NDT methods. *Construction and Building Materials*, 94, 565-571. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.078
- Elsen, J. (2006). Microscopy of historic mortars-a review. *Cement and Concrete Research*, 36(8), 1416-1424. doi: 10.1016/j.cemconres.2005.12.006
- Esteves, L. P., Cachim, P., & Ferreira, V. M. (2007). *Mechanical properties of cement mortars with superabsorbent polymers*. Paper presented at the Advances in Construction Materials 2007.
- Goldsmith, W., Polivka, M., & Yang, T. (1966). Dynamic behavior of concrete. *Experimental Mechanics*, 6(2), 65-79. doi: 10.1007/BF02326224

- Gonçalves, J. P., Tavares, L. M., Toledo Filho, R. D., Fairbairn, E. M. R., & Cunha, E. R. (2007). Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 37(6), 924-932. doi: 10.1016/j.cemconres.2007.03.009
- Grassl, P., Wong, H. S., & Buenfeld, N. R. (2010). Influence of aggregate size and volume fraction on shrinkage induced micro-cracking of concrete and mortar. *Cement and Concrete Research*, 40(1), 85-93. doi: 10.1016/j.cemconres.2009.09.012
- Haach, V. G., Carrazedo, R., Oliveira, L. M. F., & Corrêa, M. R. S. (2013). Application of acoustic tests to mechanical characterization of masonry mortars. *NDT and E International*, 59, 18-24. doi: 10.1016/j.ndteint.2013.04.013
- Haach, V. G., Vasconcelos, G., & Loureno, P. B. (2011). Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars. *Construction and Building Materials*, 25(6), 2980-2987. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.011
- Hernández-Olivares, F., & Mayor-Lobo, P. (2011). Experimental assessment of commercial one-coat renders for buildings facades. *Construction and Building Materials*, 25(1), 156-162. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.044
- Herve, E., Care, S., & Seguin, J. P. (2010). Influence of the porosity gradient in cement paste matrix on the mechanical behavior of mortar. *Cement and Concrete Research*, 40(7), 1060-1071. doi: 10.1016/j.cemconres.2010.02.010
- Hossain, A. B., & Weiss, J. (2006). The role of specimen geometry and boundary conditions on stress development and cracking in the restrained ring test. *Cement and Concrete Research*, 36(1), 189-199. doi: 10.1016/j.cemconres.2004.06.043
- Ide, J. M. (1935). Some dynamic methods for determination of Young's modulus. *Review of Scientific Instruments*, 6(10), 296-298. doi: 10.1063/1.1751876
- Jones, R. (1962). *Non-destructive Testing of Concrete*.
- Juenger, M. C. G., Winnefeld, F., Provis, J. L., & Ideker, J. H. (2011). Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1232-1243. doi: 10.1016/j.cemconres.2010.11.012
- Kolluru, S. V., Popovics, J. S., & Shah, S. P. (2000). Determining elastic properties of concrete using vibrational resonance frequencies of standard test cylinders. *Cement, Concrete and Aggregates*, 22(2), 81-89.
- Kovler, K., & Roussel, N. (2011). Properties of fresh and hardened concrete. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 775-792. doi: 10.1016/j.cemconres.2011.03.009
- Lu, X., Sun, Q., Feng, W., & Tian, J. (2013). Evaluation of dynamic modulus of elasticity of concrete using impact-echo method. *Construction and Building Materials*, 47, 231-239. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.04.043
- Lydon, F. D., & Balendran, R. V. (1986). Some observations on elastic properties of plain concrete. *Cement and Concrete Research*, 16(3), 314-324. doi: 10.1016/0008-8846(86)90106-7
- Maia, L., Azenha, M., Faria, R., & Figueiras, J. (2011). Influence of the cementitious paste composition on the E-modulus and heat of hydration evolutions. *Cement and Concrete Research*, 41(8), 799-807. doi: 10.1016/j.cemconres.2011.03.008

- Majeed, S. A. (2011). Effect of specimen size on compressive, modulus of rupture and splitting strength of cement mortar. *Journal of Applied Sciences*, 11(3), 584-588. doi: 10.3923/jas.2011.584.588
- Malaikah, Ala, Al-Saif, Khalid, & Al-Zaid, Rajeh. (2004). Prediction of the dynamic modulus of elasticity of concrete under different loading conditions. *International Conference On Concrete Engineering and Technology*.
- Malhotra, V. M., & Sivasundaram, V. (2004). Resonant frequency methods. *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, 71-721.
- Martínez-Molina, W., Torres-Acosta, A. A., Jáuregui, J. C., Chávez-García, H. L., Alonso-Guzmán, E. M., Graff, M., & Arteaga-Arcos, J. C. (2014). Predicting concrete compressive strength and modulus of rupture using different NDT techniques. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014. doi: 10.1155/2014/742129
- Meyer, C. (2009). The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*, 31(8), 601-605. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010
- Nagy, A. (1997). Determination of E-modulus of young concrete with nondestructive method. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 9(1), 15-20.
- Naik, T. R., Singh, S., & Ramme, B. (1998). Mechanical properties and durability of concrete made with blended fly ash. *ACI Materials Journal*, 95(4), 454-462.
- Narayan Swamy, R. (1971). Dynamic Poisson's ratio of portland cement paste, mortar and concrete. *Cement and Concrete Research*, 1(5), 559-583. doi: 10.1016/0008-8846(71)90060-3
- Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete (4th Edition)*. (5th ed.). London: Pearson Education Limited.
- Ohama, Y. (1998). Polymer-based admixtures. *Cement and Concrete Composites*, 20(2-3), 189-212.
- Paiva, H., Esteves, L. P., Cachim, P. B., & Ferreira, V. M. (2009). Rheology and hardened properties of single-coat render mortars with different types of water retaining agents. *Construction and Building Materials*, 23(2), 1141-1146. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.06.001
- Philleo, R. E. (1955). Comparison of Results of Three Methods for Determining Young's Modulus of Elasticity of Concrete. *Journal Proceedings*, 51(1), 461-470. doi: 10.14359/11690
- Picket, G. (1945). Equations for Computing Elastic Constants from Flexural and Torsional Resonant Frequencies of Vibration of Prisms and Cylinders. *Proceedings of the American Society for Testing and Materials. Portland Cement Association*, Vol. 45, 846-865.
- Popovics, J. S. (1997). Effects of Poisson's ratio on impact-echo test analysis. *Journal of Engineering Mechanics*, 123(8), 843-850.
- Popovics, Jonh S., Zemajtis, J., & Shkolnik, I. (2008). A study of static and dynamic modulus of elasticity of concrete.
- Popovics, S., & Popovics, J. S. (1992). *Critique of the ultrasonic pulse velocity method for testing concrete*. Paper presented at the Nondestructive Testing of Concrete Elements and Structures.
- Rao, G. A. (2001a). Development of strength with age of mortars containing silica fume. *Cement and Concrete Research*, 31(8), 1141-1146. doi: 10.1016/S0008-8846(01)00540-3

- Rao, G. A. (2001b). Generalization of Abrams' law for cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 31(3), 495-502. doi: 10.1016/S0008-8846(00)00473-7
- Rosell, J. R., & Cantalapiedra, I. R. (2011). Simple method of dynamic Young's modulus determination in lime and cement mortars. *Materiales de Construcción*, 61(301), 39-48. doi: 10.3989/mc.2010.53509
- Scrivener, K. L., & Kirkpatrick, R. J. (2008). Innovation in use and research on cementitious material. *Cement and Concrete Research*, 38(2), 128-136. doi: 10.1016/j.cemconres.2007.09.025
- Scherer, George W. (1990). Theory of drying. *Journal of the American Ceramic Society*, 73(1), 3-14.
- Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., & Bolio, H. (2011). Sustainable cement production-present and future. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 642-650. doi: 10.1016/j.cemconres.2011.03.019
- Schulze, Joachim. (1999). Influence of water-cement ratio and cement content on the properties of polymer-modified mortars. *Cement and Concrete Research*, 29(6), 909-915. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00060-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00060-5)
- Shkolnik, I. E. (2005). Effect of nonlinear response of concrete on its elastic modulus and strength. *Cement and Concrete Composites*, 27(7-8), 747-757. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.12.006>
- Singh, S. B., Munjal, Pankaj, & Thammishetti, Nikesh. (2015). Role of water/cement ratio on strength development of cement mortar. *Journal of Building Engineering*, 4, 94-100. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2015.09.003>
- Soares, A., Flores-Colen, I., & De Brito, J. (2015). Use of non-standard specimens to study the compressive strength of multi-coat renders. *Journal of Testing and Evaluation*, 43(5), 1055-1065. doi: 10.1520/JTE20140028
- Strang, G., & Fix, G. J. (1973). *An Analysis of the Finite Element Method*.
- Swamy, N., & Rigby, G. (1971). Dynamic properties of hardened paste, mortar and concrete. *Matériaux et Constructions*, 4(1), 13-40. doi: 10.1007/BF02473927
- Swamy, R. N., & Bandyopadhyay, A. K. (1975). ELASTIC PROPERTIES OF STRUCTURAL LIGHTWEIGHT CONCRETE. *Proc Inst Civ Eng (Lond)*, 59(pt 2), 381-394.
- Toma, I. O., Covatariu, D., Toma, A. M., Taranu, G., & Budescu, M. (2013). Strength and elastic properties of mortars with various percentages of environmentally sustainable mineral binder. *Construction and Building Materials*, 43, 348-361. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.061
- UNE-EN_196-1. (2005). Método de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas. *AENOR*.
- UNE-EN_197-1. (2011). Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes. *AENOR*.
- UNE-EN_413-1. (2011). Cementos de albañilería. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad. *AENOR*.
- UNE-EN_413-2. (2006). Cementos de albañilería. Parte 2: Métodos de ensayo. *AENOR*.

- UNE-EN_459-1. (2011). Cales para albañilería. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad. *AENOR*.
- UNE-EN_934-1. (2009). Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 1: Requisitos comunes. *AENOR*.
- UNE-EN_998-1. (2010). Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: morteros para revoco y enlucido. *AENOR*.
- UNE-EN_1015-2. (1999). Método de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 2: Toma de muestras total de morteros y preparación de los morteros para ensayo. *AENOR*.
- UNE-EN_1015-3. (2003). Método de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas). *AENOR*.
- UNE-EN_1015-6. (1999). Método de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco. *AENOR*.
- UNE-EN_1015-7. (1999). Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 7: Determinación del contenido en aire en el mortero fresco. *AENOR*.
- UNE-EN_1015-9. (2000). Método de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 9: Determinación del periodo de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco. *AENOR*.
- UNE-EN_1015-10. (2000). Método de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido. *AENOR*.
- UNE-EN_1015-11. (2000). Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido. *AENOR*.
- UNE-EN_1015-12. (2000). Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 12: Determinación de la resistencia a la adhesión de los morteros para revocos y enlucidos endurecidos aplicados sobre soportes. *AENOR*.
- UNE-EN_1352. (1997). Determinación del módulo de elasticidad estática bajo compresión del hormigón curado en autoclave o de áridos ligeros con estructura abierta. *AENOR*.
- UNE-EN_13139. (2003). Áridos para morteros. *AENOR*.
- UNE-EN_14146. (2004). Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del módulo de elasticidad dinámico (con la medida de la frecuencia de resonancia fundamental). *AENOR*.
- UNE-EN_ISO_12680-1. (2007). Métodos de ensayo para productos refractarios. Parte 1: Determinación del módulo de Young dinámico (MOE) por excitación de la vibración por impulso. *AENOR*.
- UNE_41302-IN. (2013). Instrucciones para la aplicación de moretos de revestimiento exteriores e interiores. *AENOR*.
- UNE_80112-EX. (1989). Métodos de ensayo de cementos. Ensayos físicos. Determinación de la retracción de secado y del hinchamiento en agua. *AENOR*.
- UNE_80305. (2012). Cementos blancos. *AENOR*.
- UNE_83816-EX. (1993). Morteros. MÉTODOS DE ENSAYO. Morteros frescos. Determinación de la capacidad de retención de agua. *AENOR*.

- Válek, J., Hughes, J. J., & Groot, C. J. W. P. (2013) Historic mortars: Characterisation, assessment and repair. A state-of-the-art summary. *Vol. 7. RILEM Bookseries* (pp. 1-12).
- Válek, J., & Veiga, R. (2005). *Characterisation of mechanical properties of historic mortars - Testing of irregular samples*. Paper presented at the WIT Transactions on the Built Environment.
- Valentini, L., Parisatto, M., Russo, V., Ferrari, G., Bullard, J. W., Angel, R. J., . . . Artioli, G. (2014). Simulation of the hydration kinetics and elastic moduli of cement mortars by microstructural modelling. *Cement and Concrete Composites*, 52, 54-63. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.05.005
- Wang, J. C. (1984). Young's modulus of porous materials - Part 1 Theoretical derivation of modulus-porosity correlation. *Journal of Materials Science*, 19(3), 801-808. doi: 10.1007/BF00540451
- Washizu, K. (1982). *Variational Methods in Elasticity and Plasticity*.
- Winslow, D. N., Cohen, M. D., Bentz, D. P., Snyder, K. A., & Garboczi, E. J. (1994). Percolation and pore structure in mortars and concrete. *Cement and Concrete Research*, 24(1), 25-37. doi: 10.1016/0008-8846(94)90079-5
- Yaman, I. O., Hearn, N., & Aktan, H. M. (2002). Active and non-active porosity in concrete. Part I: Experimental evidence. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 34(246), 102-109.
- Yurtdas, I., Peng, H., Burlion, N., & Skoczylas, F. (2006). Influences of water by cement ratio on mechanical properties of mortars submitted to drying. *Cement and Concrete Research*, 36(7), 1286-1293. doi: 10.1016/j.cemconres.2005.12.015
- Zhang, W., Zakaria, M., & Hama, Y. (2013). Influence of aggregate materials characteristics on the drying shrinkage properties of mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, 49, 500-510. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.069
- Zhou, J., Chen, X., Wu, L., & Kan, X. (2011). Influence of free water content on the compressive mechanical behaviour of cement mortar under high strain rate. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 36(3), 357-369. doi: 10.1007/s12046-011-0024-6
- Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2005). *The Finite Element Method Set*.

Anexo A. Datos y resultados.

A.1.	SERIE MP 1.....	175
A.2.	SERIE MP 2.....	177
A.3.	SERIE MP 3.....	178
A.4.	SERIE MP 4.....	179
A.5.	SERIE MP 5.....	180
A.6.	SERIE MP 6.....	181
A.7.	SERIE MP 7.....	182
A.8.	SERIE MP 8.....	184
A.9.	SERIE MP 9.....	185
A.10.	SERIE MP 10.....	188
A.13.	SERIE MP 13.....	191
A.14.	SERIE MP 14.....	193
A.15.	SERIE MP 15.....	196
A.16.	SERIE MP 16.....	199
A.19.	SERIE MP 19.....	202
A.20.	SERIE MP 20.....	204
A.21.	SERIE MP 21.....	206
A.22.	SERIE MP 22.....	208
A.23.	SERIE MP 23.....	211
A.24.	SERIE MP 24.....	214
A.27.	SERIE MP 27.....	219
A.28.	SERIE MP 28.....	222
A.29.	SERIE MP 29.....	225
A.30.	SERIE MP 30.....	228
A.31.	SERIE MP 31.....	231
A.32.	SERIE MP 32.....	234
A.33.	SERIE E.....	239
A.34.	SERIE F.....	242

En este capítulo se resumen los datos obtenidos en los ensayos de las diferentes muestras de mortero y los cálculos derivados de ellos de acuerdo a las ecuaciones y la nomenclatura establecidas en cada caso.

A.1. Serie MP 1

Fecha de amasado: 11 de noviembre de 2014

Fecha de rotura: 9 de Diciembre de 2014

Dimensiones 40x40x160 mm

Datos de ensayos.

MP 1-1 Deformación longitudinal de compresión.

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA 5% [kN]	CARGA 33% [kN]	ϵ 5% [$\mu\epsilon$]	ϵ 33% [$\mu\epsilon$]
MP01A		0,60	4,00	84	492
MP01B	28	0,60	4,00	75	465
MP01C		0,60	4,00	79	483

MP 1-2 Carga máxima (flexión en tres puntos).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP01A		1,12
MP01B	28	1,10
MP01C		1,20

MP 1-3 Carga máxima (compresión).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP01A		11,00
MP01B	28	12,05
MP01C		12,34
		11,73
		11,42
		12,25

Valores de resistencia.

MP 1-4 Flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	f	[MPa]	C.V.
MP01A		2,65		
MP01B	28	2,60	2,7	3,9%
MP01C		2,80		

MP 1-5 Compresión.

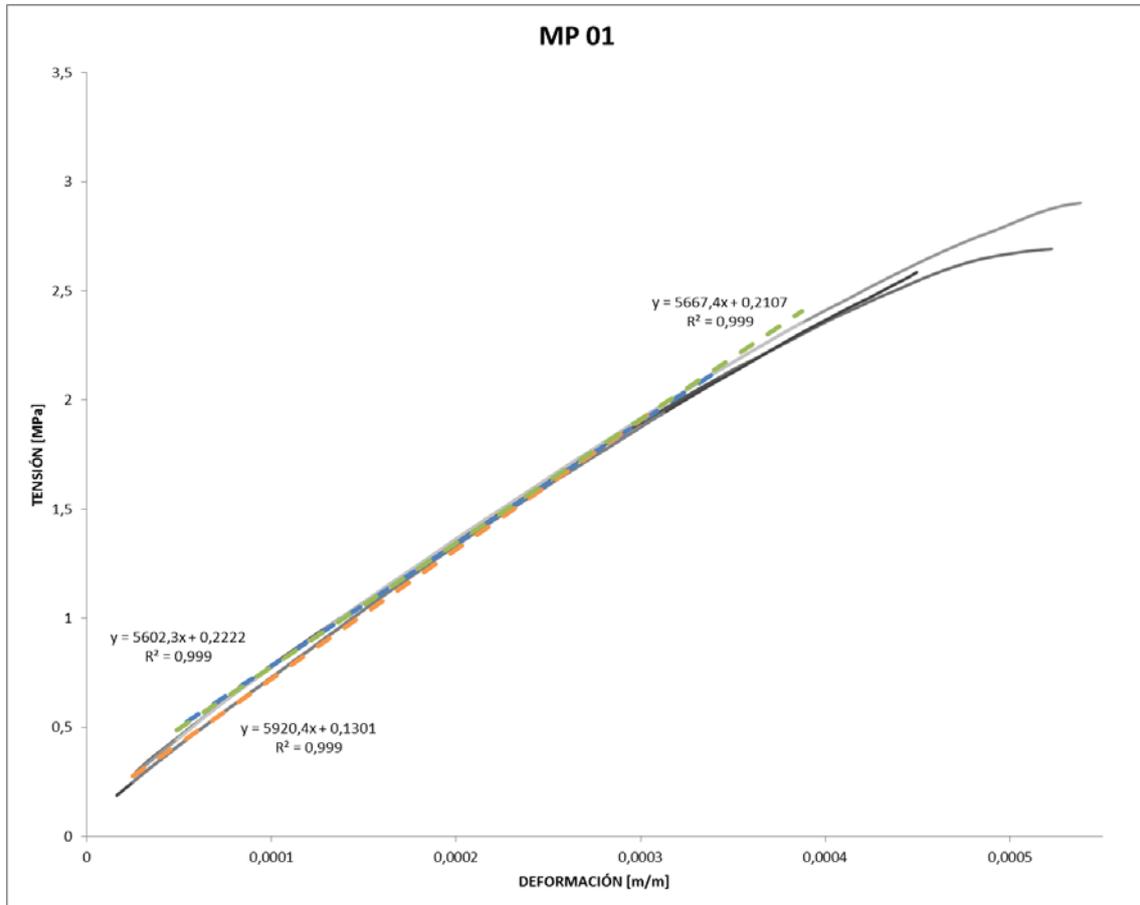
MUESTRA	EDAD [d]	f	[MPa]	C.V.
MP01A		6,90		
MP01B	28	7,55	7,4	4,2%
MP01C		7,70		
		7,35		
		7,15		
		7,65		

Valores de Módulo de elasticidad.

MP 1-6 Módulo elástico bajo compresión.

MUESTRA	EDAD [d]	E_m	[MPa]	C.V.
MP01A		5208		
MP01B	28	5449	5306	2,4%
MP01C		5260		

MP 1-7 Curva tensión deformación y módulo elástico (flexotracción).



MUESTRA	EDAD [d]	E_m	[MPa]	C.V.
MP01A		5602		
MP01B	28	5920	5730	2,9%
MP01C		5667		

A.2. Serie MP 2

Fecha de amasado: 11 de noviembre de 2014

Fecha de rotura: 9 de Diciembre de 2014

Dimensiones 40x40x160 mm

Datos de ensayos.

MP 2-1 Carga máxima (flexión en tres puntos).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP02A		1,08
MP02B	28	1,13
MP02C		1,20

MP 1-3 Carga máxima (compresión).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP02A		11,18
MP02A		11,29
MP02B	28	11,52
MP02B		11,72
MP02C		11,73
MP02C		11,29

Valores de resistencia.

MP 1-2 Flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	f	[MPa]	C.V.
MP02A		2,55		
MP02B	28	2,65	2,7	4,7%
MP02C		2,80		

MP 1-4 Compresión.

MUESTRA	EDAD [d]	f	[MPa]	C.V.
MP02A		6,99		
MP02A		7,06		
MP02B	28	7,20	7,2	2,1%
MP02B		7,33		
MP02C		7,33		
MP02C		7,06		

A.3. Serie MP 3

Fecha de amasado: 11 de noviembre de 2014

Fecha de rotura: -

Dimensiones 40x40x160 mm

Datos de ensayos.

MP 3-1 Frecuencia de resonancia longitudinal¹.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP03A		0,3760	5704
MP03B	77	0,3797	5820
MP03C		0,3804	5788

MP 3-3 Frecuencia de resonancia transversal¹.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP03A		0,3760	2464
MP03B	77	0,3797	2508
MP03C		0,3804	

Valores de Módulo elástico.

MP 3-2 MOE longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MOElong [MPa]	C.V.
MP03A		4955	
MP03B	77	5145	5066 1,9%
MP03C		5098	

MP 3-4 MOE de flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	MOEflex [MPa]	C.V.
MP03A		4946	
MP03B	77	5016	4981 1,0%
MP03C			

¹ Medición realizada con acelerómetro uniaxial.

A.4. Serie MP 4

Fecha de amasado: 11 de noviembre de 2014

Fecha de rotura: -

Dimensiones 40x40x160 mm

Datos de ensayos.

MP 4-1 Frecuencia de resonancia longitudinal¹.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP04A		0,3790	5488
MP04B	77	0,3772	5636
MP04C		0,3795	5536

MP 1-3 Frecuencia de resonancia transversal¹.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP04A		0,3790	2344
MP04B	77	0,3772	2412
MP04C		0,3795	

Valores de Módulo elástico.

MP 1-2 MOE longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MOE _{long} [MPa]	C.V.
MP04A		4566	
MP04B	77	4793	4670 2,5%
MP04C		4652	

MP 1-4 MOE de flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	MOE _{flex} [MPa]	C.V.
MP04A		4374	
MP04B	77	4609	4491 3,7%
MP04C			

¹ Medición realizada con acelerómetro uniaxial.

A.5. Serie MP 5

Fecha de amasado: 11 de noviembre de 2014

Fecha de rotura: -

Dimensiones 25x25x285 mm

Datos de ensayos.

MP 5-1 Frecuencia de resonancia longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP05A		0,3042	3652
MP05B	154	0,3115	3692
MP05C		0,3126	3678

MP 5-2 Frecuencia de resonancia transversal.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP05A		0,3042	618
MP05B	154	0,3115	616
MP05C		0,3126	604
			624
			618
			606

Valores de Módulo elástico.

MP 5-3 MOE longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MOE _{long} [MPa]	C.V.
MP05A		7400	
MP05B	154	7745 7588	2,5%
MP05C		7713	

MP 5-4 MOE de flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	MOE _{flex} [MPa]	C.V.
MP05A		6865	
MP05B	154	6714 6846	2,5%
MP05C		7166	
		7054	
		6783	

A.6. Serie MP 6

Fecha de amasado: 11 de noviembre de 2014

Fecha de rotura: -

Dimensiones 25x25x285 mm

Datos de ensayos.

MP 6-1 Frecuencia de resonancia longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP06A		0,3115	3658
MP06B	154	0,3021	3430
MP06C		0,3030	3698

MP 6-2 Frecuencia de resonancia transversal.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP06A		0,3115	602
MP06B	154	0,3021	616
MP06C		0,3030	524
			560
			598
			618

Valores de Módulo elástico.

MP 6-3 MOE longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MOElong [MPa]	C.V.
MP06A		7425	
MP06B	154	6926	7215 3,6%
MP06C		7295	

MP 6-4 MOE de flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	MOEflex [MPa]	C.V.
MP06A		6514	
MP06B	154	5940	6218 4,0%
		5980	
MP06C		6180	
		6172	

A.7. Serie MP 7

Fecha de amasado: 18 de Noviembre de 2014

Fecha de rotura: 16 de Diciembre de 2014

Dimensiones 40x40x160 mm

Datos de ensayos.

MP 7-1 Carga máxima (flexión en tres puntos).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP07A		1,07
MP07B	28	1,02
MP07C		1,29

MP 7-2 Carga máxima (compresión).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP07A		11,02
MP07B	28	9,82
MP07C		11,54
		11,02
		12,01
		11,63

Valores de resistencia.

MP 7-3 Flexión.

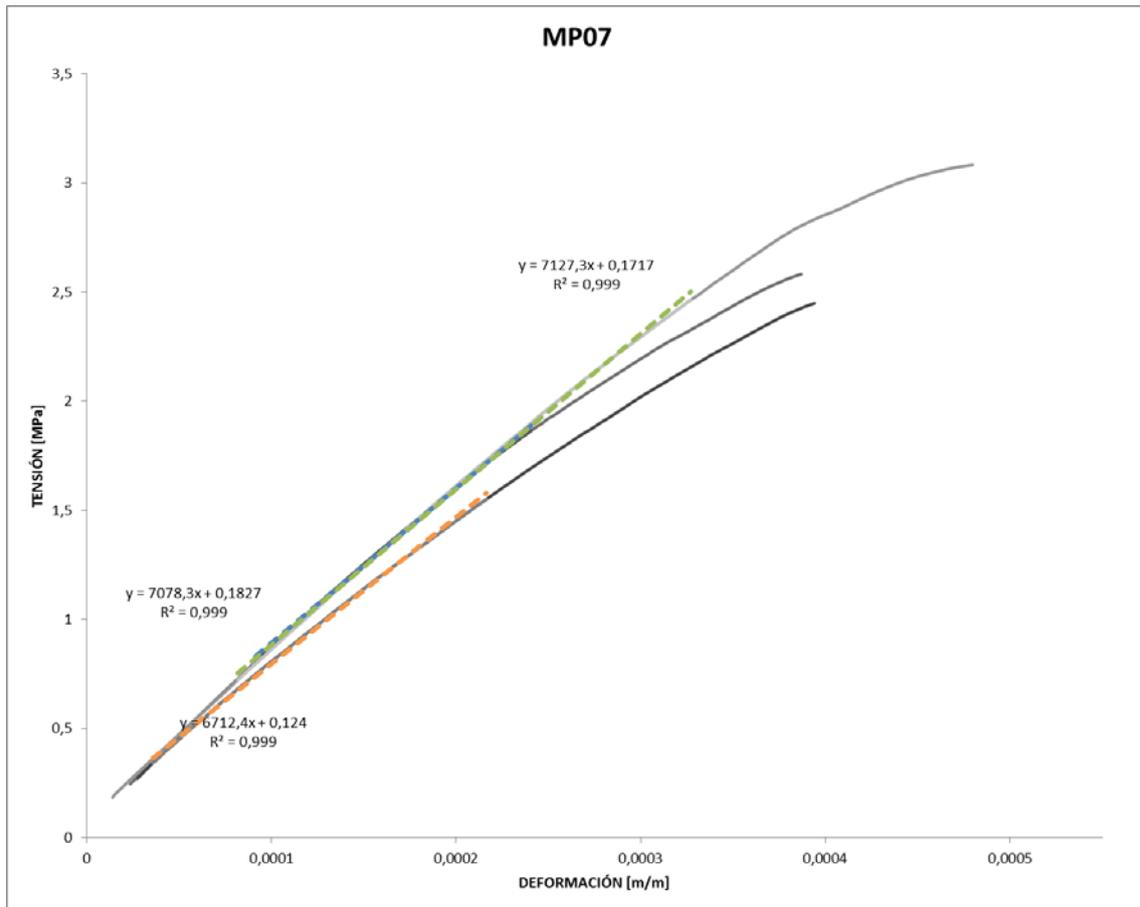
MUESTRA	EDAD [d]	f	[MPa]	C.V.
MP07A		2,50		
MP07B	28	2,40	2,6	12,2%
MP07C		3,00		

MP 7-4 Compresión.

MUESTRA	EDAD [d]	f	[MPa]	C.V.
MP07A		6,90		
MP07B	28	7,20	7,0	6,7%
		6,90		
		7,50		
		7,25		

Valores de Módulo de elasticidad.

MP 7-5 Curva tensión deformación y módulo elástico (flexotracción).



MUESTRA	EDAD [d]	E _m	[MPa]	C.V.
MP07A		7078		
MP07B	28	6712	6972	3,3%
MP07C		7127		

A.8. Serie MP 8

Fecha de amasado: 18 de Noviembre de 2014

Fecha de rotura: 16 de Diciembre de 2014

Dimensiones 40x40x160 mm

Datos de ensayos.

MP 8-1 Carga máxima (flexión en tres puntos).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP08A		1,20
MP08B	28	0,94
MP08C		0,76

MP 8-2 Carga máxima (compresión).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP08A		11,77
MP08B	28	12,05
MP08C		11,50
		11,45
		10,96
		11,58

Valores de resistencia.

MP 8-3 Flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
MP08A		2,80	
MP08B	28	2,20	22,2%
MP08C		1,80	

MP 8-4 Compresión.

MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
MP08A		7,35	
MP08B	28	7,20	3,2%
MP08C		6,85	
		7,25	

A.9. Serie MP 9

Fecha de amasado: 18 de Noviembre de 2014

Fecha de rotura: 14 de Abril de 2015

Dimensiones 40x40x160 mm

Datos de ensayos.

MP 9-1 Deformación longitudinal de compresión.

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA 5%[kN]	CARGA 33%[kN]	ε 5%[με]	ε 33%[με]
MP09A		0,60	4,00	66	452
MP09B	147	0,60	4,00	66	438
MP09C		0,60	4,00	73	484

MP 9-2 Carga máxima (flexión en tres puntos).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP09A		1,13
MP09B	147	1,16
MP09C		1,07

MP 9-3 Carga máxima (compresión).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP09A		10,46
MP09B	147	9,84
MP09C		10,12
		9,46
		9,62
MP09C		9,20

MP 9-4 Frecuencia de resonancia longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP09A		0,3983	5800
MP09B	70	0,3972	5876
MP09C		0,3945	5900
MP09A		0,3930	6056
MP09B	147	0,3910	6012
MP09C		0,3900	5924

MP 9-5 Frecuencia de resonancia transversal.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP09A	70	0,3983	2392
			2468

Valores de resistencia.

MP 9-6 Flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
MP09A		2,65	
MP09B	147	2,70	4,0%
MP09C		2,50	

MP 9-7 Compresión.

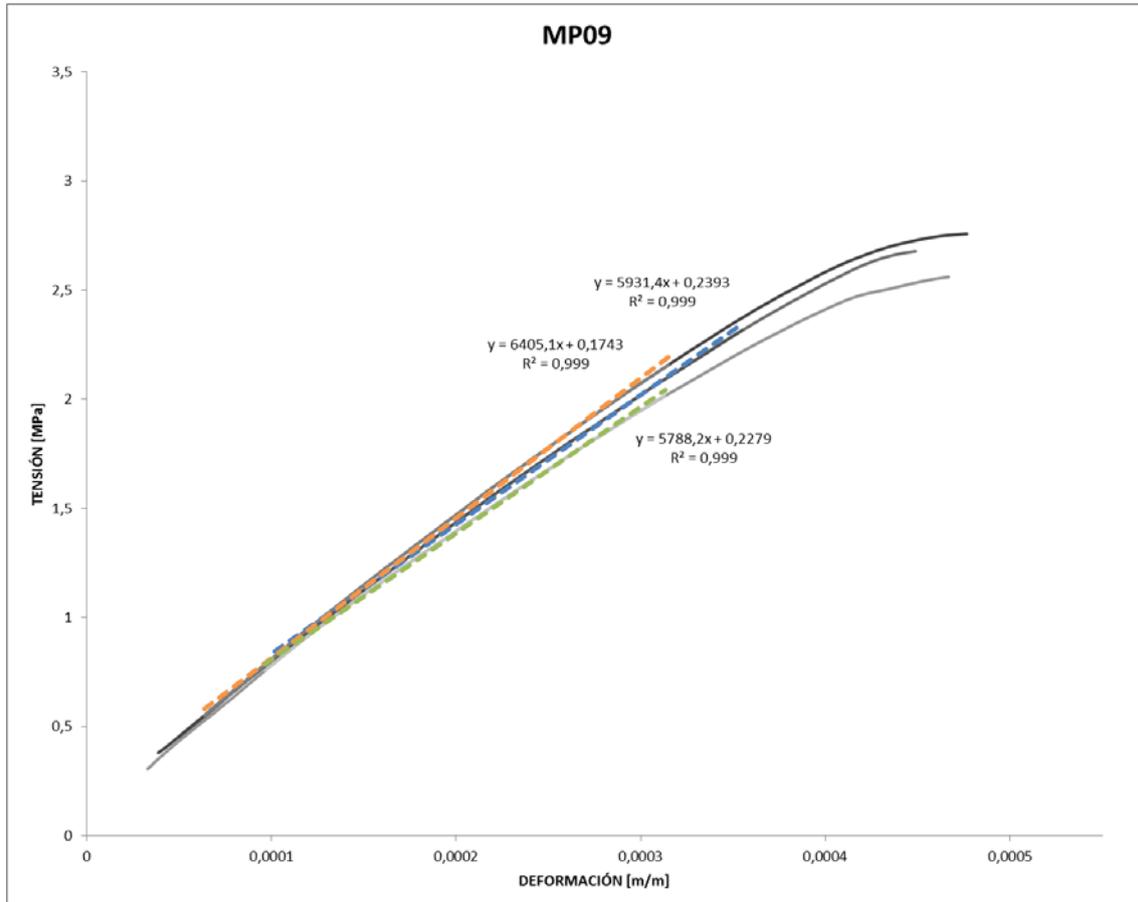
MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
MP09A		6,54	
MP09B	147	6,1	4,7%
MP09C		5,75	

Valores de Módulo de elasticidad.

MP 9-8 Módulo elástico bajo compresión.

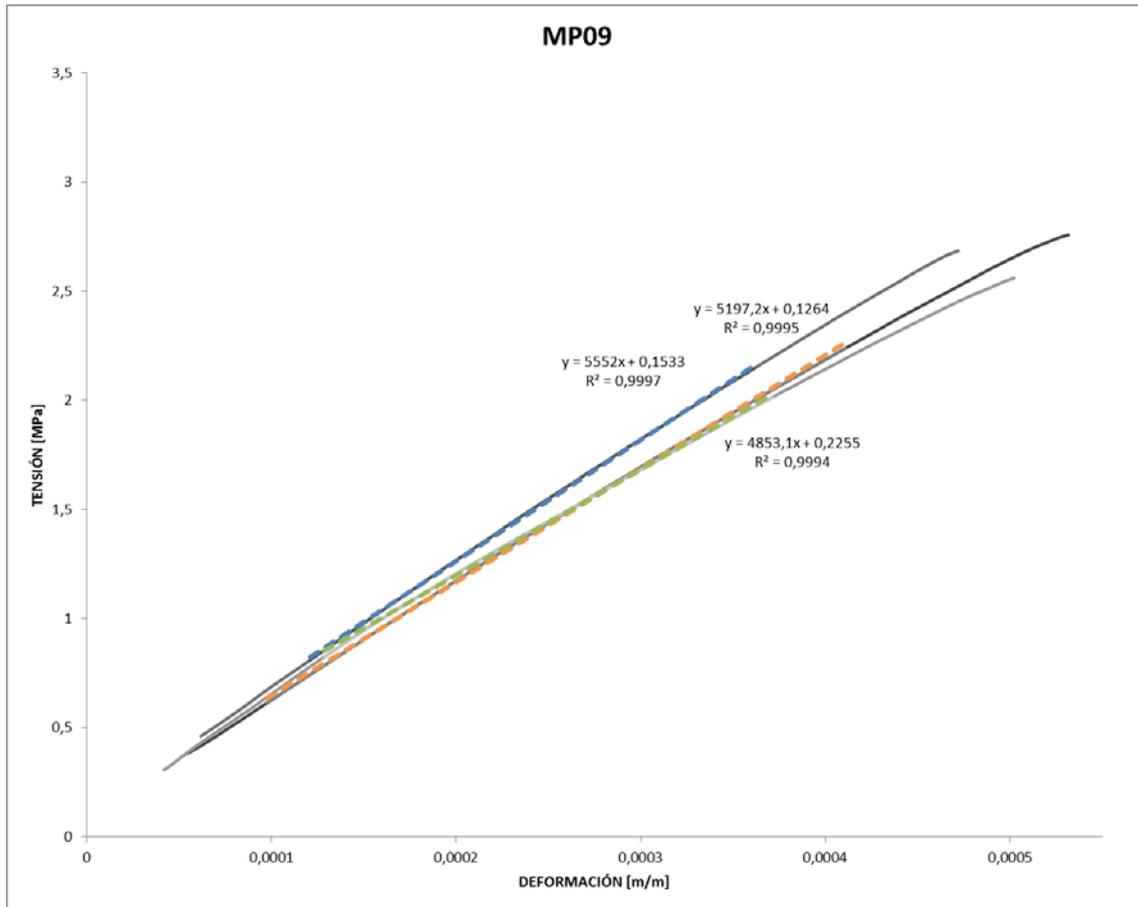
MUESTRA	EDAD [d]	E_m [MPa]	C.V.
MP09A		5505	
MP09B	147	5712 5463	5,0%
MP09C		5170	

MP 9-9 Curva tensión deformación y módulo elástico (flexotracción).



MUESTRA	EDAD [d]	E_m [MPa]	C.V.
MP09A		5931	
MP09B	147	6405 6041	5,3%
MP09C		5788	

MP 9-10 Curva tensión deformación y módulo elástico (compresión).



MUESTRA	EDAD [d]	E_m [MPa]	C.V.
MP09A		5552	
MP09B	147	5197	6,7%
MP09C		4853	

MP 9-11 MOE longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MOElong [MPa]	C.V.
MP09A		5306	
MP09B	70	5458	1,8%
MP09C		5493	
MP09A		5708	
MP09B	147	5625	2,1%
MP09C		5475	

MP 9-12 MOE de flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	MOE _{flex} [MPa]	C.V.
MP09A	70	5427	3,2%
		5681	

A.10. Serie MP 10

Fecha de amasado: 18 de Noviembre de 2014

Fecha de rotura: 19 de Mayo de 2015

Dimensiones 40x40x160 mm

Datos de ensayos.

MP 10-1 Deformación longitudinal de compresión.

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA 5%[kN]	CARGA 33%[kN]	ϵ 5%[$\mu\epsilon$]	ϵ 33%[$\mu\epsilon$]
MP10A				91	554
MP10B	182	0,60	4,00	91	513
MP10C				104	544

MP 10-2 Carga máxima (flexión en tres puntos).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP10A		0,95
MP10B	182	1,06
MP10C		1,06

P 10-4 Frecuencia de resonancia longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP10A		0,3859	5956
MP10B	70	0,3886	5920
MP10C		0,3884	5920
MP10A		0,3836	5812
MP10B	182	0,3834	5800
MP10C		0,3842	5968

MP 10-3 Carga máxima (compresión).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP10A		10,37
MP10A		10,25
MP10B	182	11,08
MP10B		11,02
MP10C		10,97
MP10C		11,55

MP 10-5 Frecuencia de resonancia transversal.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP10A		0,3836	2432
MP10A			2444
MP10B	182	0,3834	2392
MP10B			2448
MP10C		0,3842	2480
MP10C			2488

Valores de resistencia.

MP 10-6 Flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
MP10A		2,25	
MP10B	182	2,50	2,4 6,0%
MP10C		2,50	

MP 10-7 Compresión.

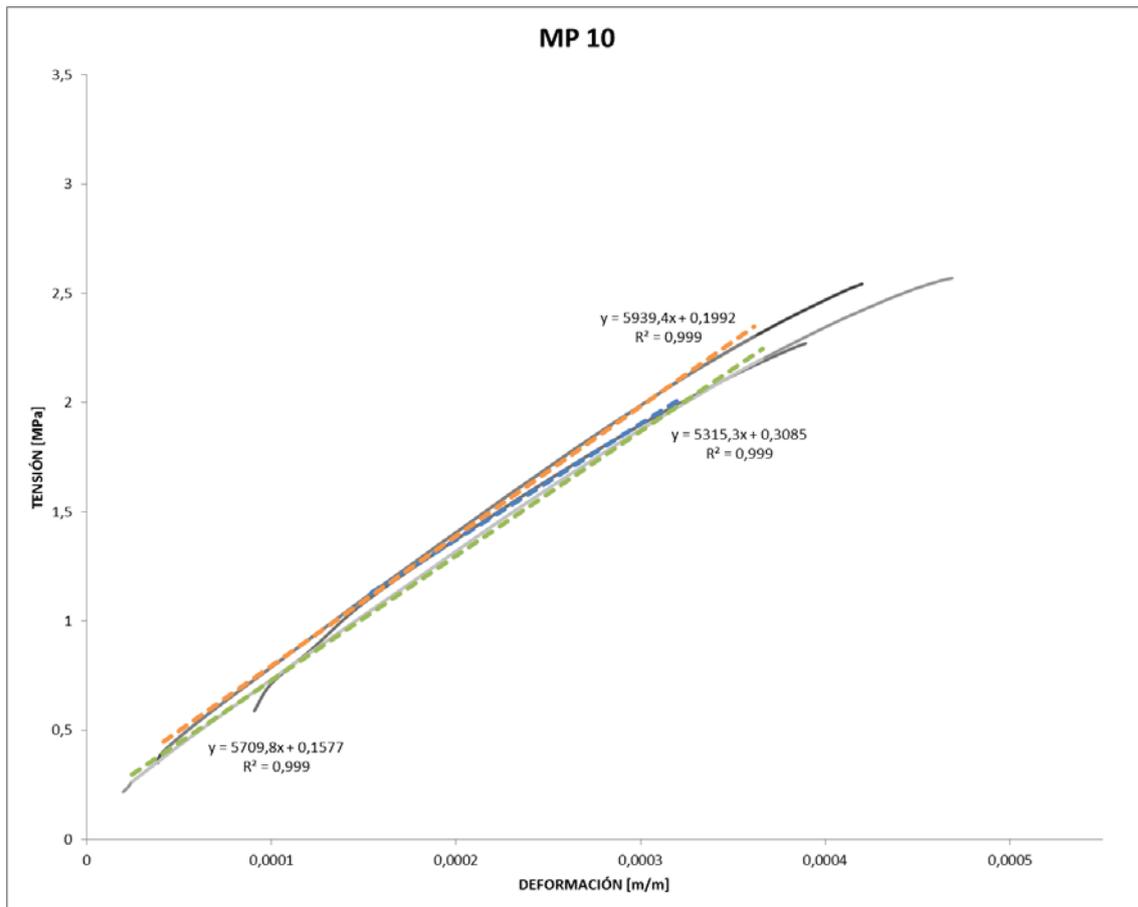
MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
MP10A		6,50	
MP10A		6,40	
MP10B	182	6,95	6,8 4,4%
MP10B		6,90	
MP10C		6,85	
MP10C		7,20	

Valores de Módulo de elasticidad.

MP 10-8 Módulo elástico bajo compresión.

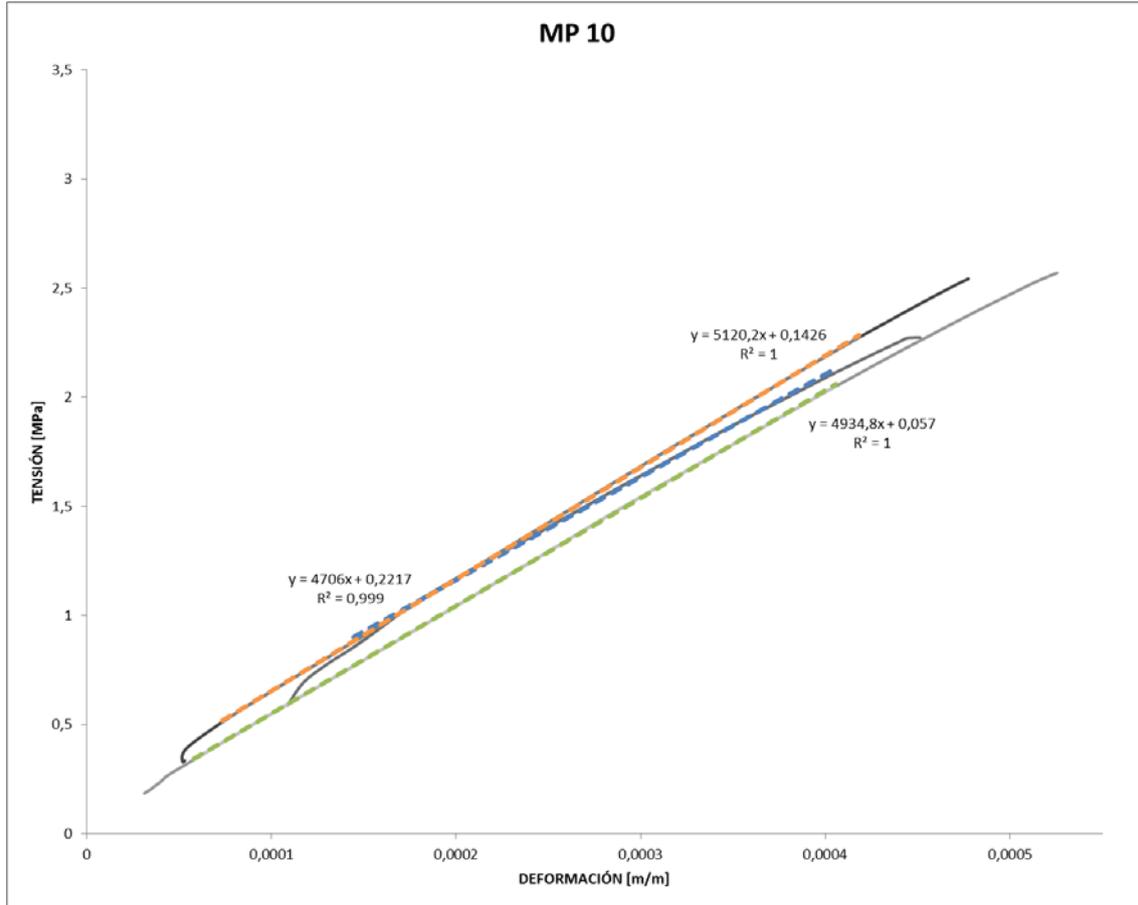
MUESTRA	EDAD [d]	E_m [MPa]	C.V.
MP10A		4590	
MP10B	182	5036 4818	4,6%
MP10C		4830	

MP 10-9 Curva tensión deformación y módulo elástico (flexotracción).



MUESTRA	EDAD [d]	E_m [MPa]	C.V.
MP10A		5315	
MP10B	182	5939 5655	5,6%
MP10C		5710	

MP 10-10 Curva tensión deformación y módulo elástico (compresión).



MUESTRA	EDAD [d]	E_m [MPa]	C.V.
MP10A		4706	
MP10B	182	5120 4920	4,2%
MP10C		4935	

MP 10-11 MOE longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MOE _{long} [MPa]	C.V.
MP10A		5503	
MP10B	70	5448 5465	0,6%
MP10C		5445	
MP10A		5209	
MP10B	182	5159 5281	3,2%
MP10C		5474	

MP 10-12 MOE de flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	MOE _{flex} [MPa]	C.V.
MP10A		4893	
MP10B	182	4673 4914	2,8%
MP10C		5034	
MP10C		5066	

A.13. Serie MP 13

Fecha de amasado: 16 de diciembre de 2014

Fecha de rotura: 13 de enero de 2015

Dimensiones 40x40x160 mm

Datos de ensayos.

MP 13-1 Deformación longitudinal de compresión.

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA 5%[kN]	CARGA 33%[kN]	ϵ 5%[$\mu\epsilon$]	ϵ 33%[$\mu\epsilon$]
MP13A				84	492
MP13B	28	0,60	4,00	75	465
MP13C				79	483

MP 1-2 Carga máxima (flexión en tres puntos).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP13A		1,31
MP13B	28	1,31
MP13C		1,34

MP 1-3 Carga máxima (compresión).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP13A		12,43
MP13B	28	12,82
MP13C		12,37
		13,35
		13,34
MP13C		12,30

Valores de resistencia.

MP 1-4 Flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
MP13A		3,05	
MP13B	28	3,05	3,1 1,9%
MP13C		3,15	

MP 1-5 Compresión.

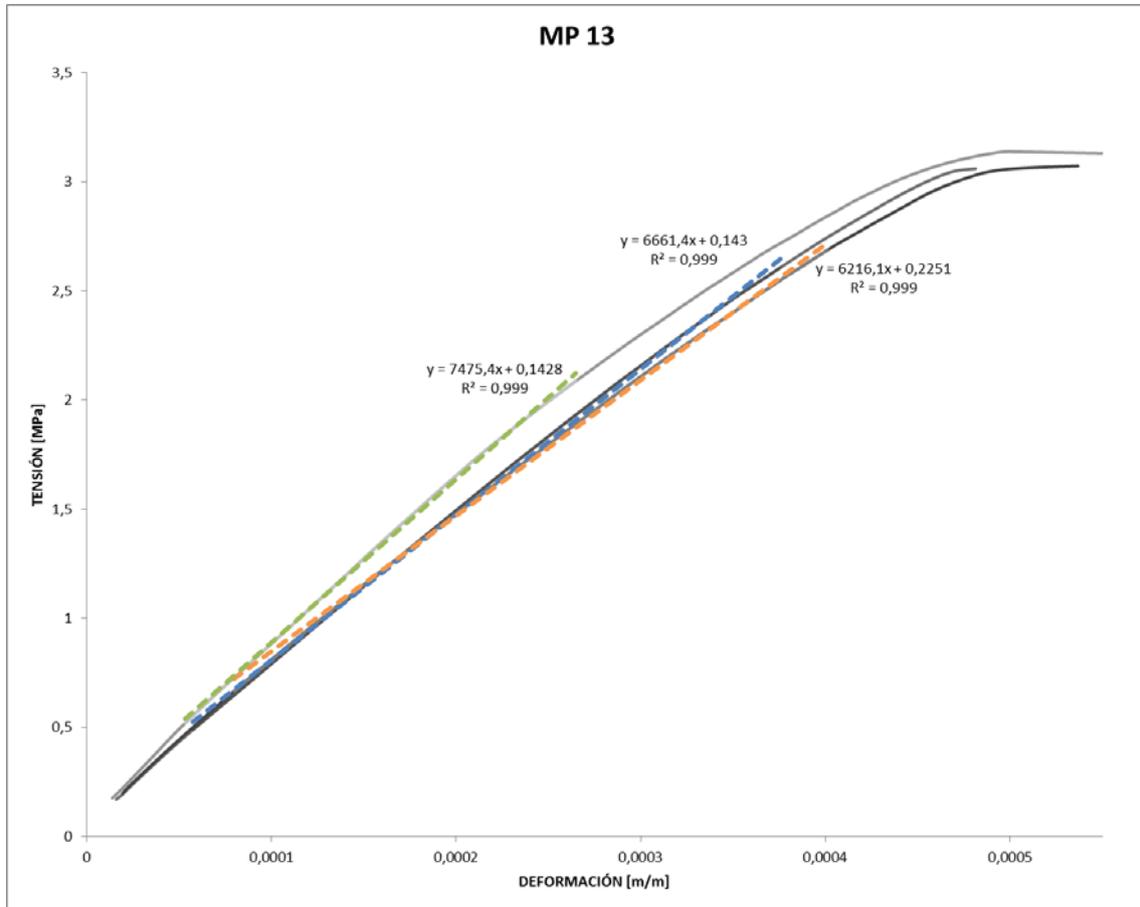
MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
MP13A		7,75	
MP13B	28	7,75	8,0 3,8%
		8,00	
		8,35	
MP13C		8,35	
		7,70	

Valores de Módulo de elasticidad.

MP 1-6 Módulo elástico bajo compresión.

MUESTRA	EDAD [d]	E_m [MPa]	C.V.
MP13A		5208	
MP13B	28	5449 5306	2,4%
MP13C		5260	

MP 1-7 Curva tensión deformación y módulo elástico (flexotracción).



MUESTRA	EDAD [d]	E_m [MPa]	C.V.
MP13A		6661	
MP13B	28	6216 6784	9,4%
MP13C		7475	

A.14. Serie MP 14

Fecha de amasado: 16 de diciembre de 2014

Fecha de rotura: 13 de enero de 2015

Dimensiones 40x40x160 mm

Datos de ensayos.

MP 14-1 Deformación longitudinal de compresión.

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA 5%[kN]	CARGA 33%[kN]	ϵ 5%[$\mu\epsilon$]	ϵ 33%[$\mu\epsilon$]
MP14A				85	470
MP14B	28	0,60	4,00	88	480
MP14C				80	463

MP 14-2 Carga máxima (flexión en tres puntos).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP14A		1,23
MP14B	28	1,30
MP14C		1,18

MP 14-3 Carga máxima (compresión).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP14A		11,79
MP14A		11,97
MP14B	28	11,67
MP14B		11,92
MP14C		12,31
MP14C		11,70

Valores de resistencia.

MP 14-4 Flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
MP14A		2,90	
MP14B	28	3,05	2,9 5,2%
MP14C		2,75	

MP 14-5 Compresión.

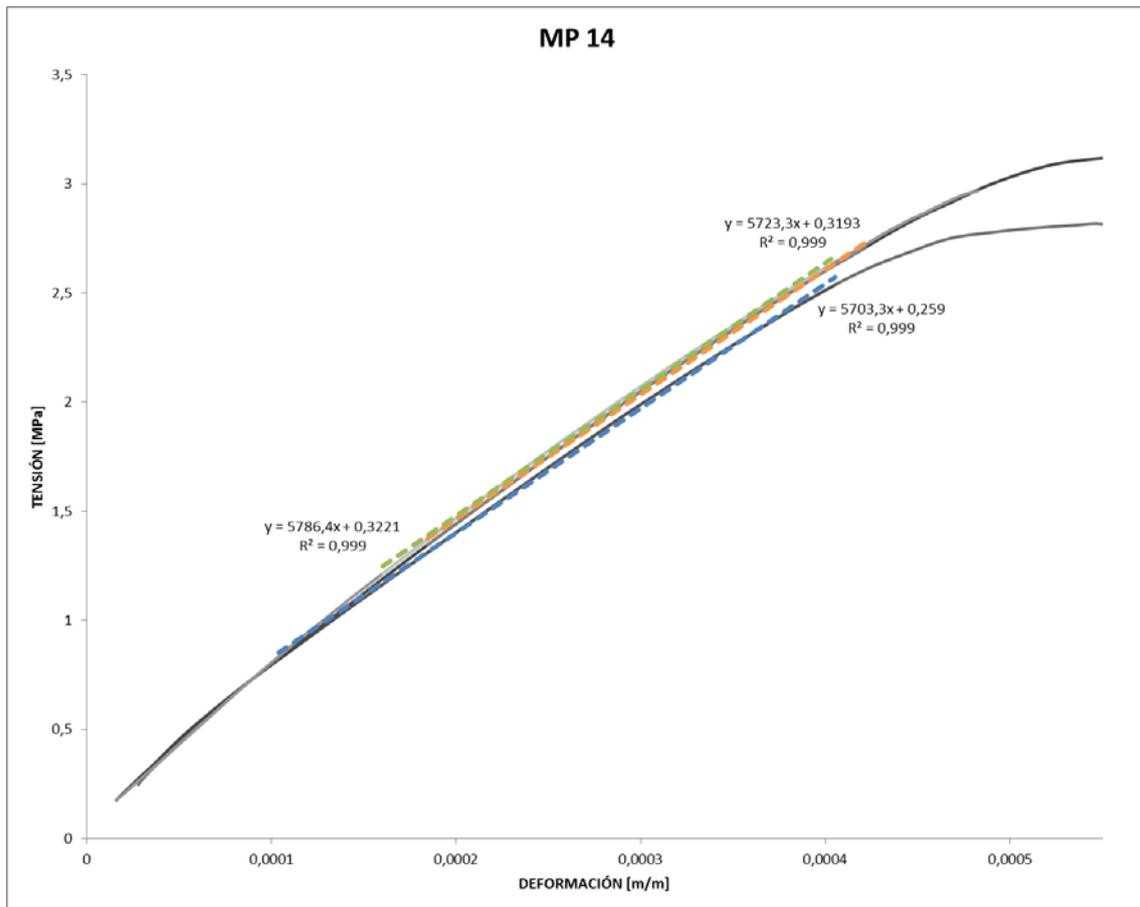
MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
MP14A		7,35	
MP14A		7,50	
MP14B	28	7,30	7,4 2,1%
MP14B		7,45	
MP14C		7,70	
MP14C		7,30	

Valores de Módulo de elasticidad.

MP 14-6 Módulo elástico bajo compresión.

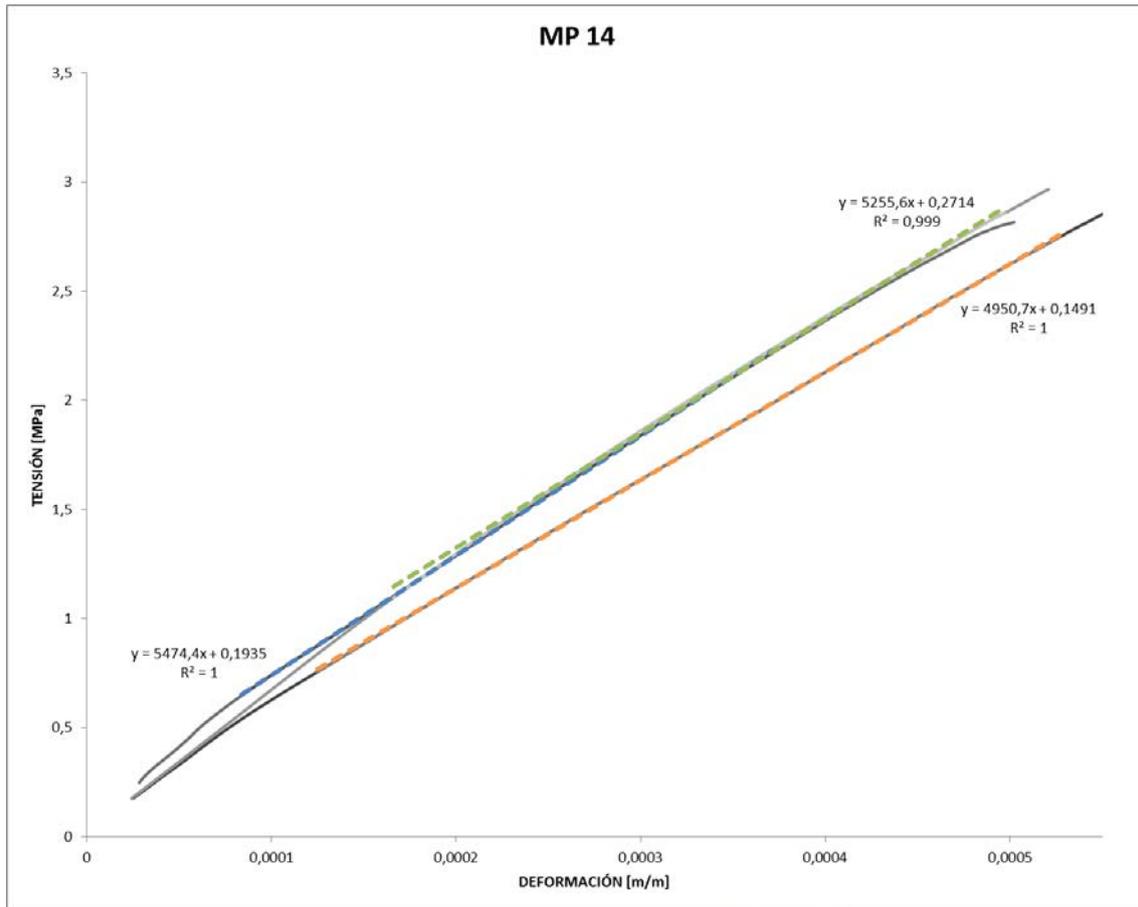
MUESTRA	EDAD [d]	E_m [MPa]	C.V.
MP14A		5519	
MP14B	28	5421 5496	1,2%
MP14C		5548	

MP 14-7 Curva tensión deformación y módulo elástico (flexotracción).



MUESTRA	EDAD [d]	E_m [MPa]	C.V.
MP14A		5703	
MP14B	28	5723 5737	0,8%
MP14C		5786	

MP 14-8 Curva tensión deformación y módulo elástico (compresión).



MUESTRA	EDAD [d]	E_m [MPa]	C.V.
MP14A		5474	
MP14B	28	4951 5227	5,0%
MP14C		5257	

A.15. Serie MP 15

Fecha de amasado: 18 de Noviembre de 2014

Fecha de rotura: 17 de Marzo de 2015

Dimensiones 40x40x160 mm

Datos de ensayos.

MP 15-1 Deformación longitudinal de compresión.

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA 5%[kN]	CARGA 33%[kN]	ϵ 5%[$\mu\epsilon$]	ϵ 33%[$\mu\epsilon$]
MP15A				108	575
MP15B	91	0,60	4,00	106	560
MP15C				86	550

MP 15-2 Carga máxima (flexión en tres puntos).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP15A		0,86
MP15B	91	0,91
MP15C		0,91

MP 15-4 Carga máxima (compresión).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP15A		9,91
MP15B	91	10,41
MP15C		10,17
		10,49
		10,55
		10,50

MP 15-3 Frecuencia de resonancia longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP15A		0,3861	5580
MP15B	42	0,3888	5584
MP15C		0,3892	5576
MP15A		0,3861	5696
MP15B	91	0,3885	5676
MP15C		0,3890	5704

MP 15-5 Frecuencia de resonancia transversal.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP15A		0,3861	2396
MP15B	91	0,3885	2440
MP15C		0,3890	2440
			2468
			2500

Valores de resistencia.

MP 15-6 Flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
MP15A		2,00	
MP15B	91	2,15	2,1 4,1%
MP15C		2,15	

MP 15-7 Compresión.

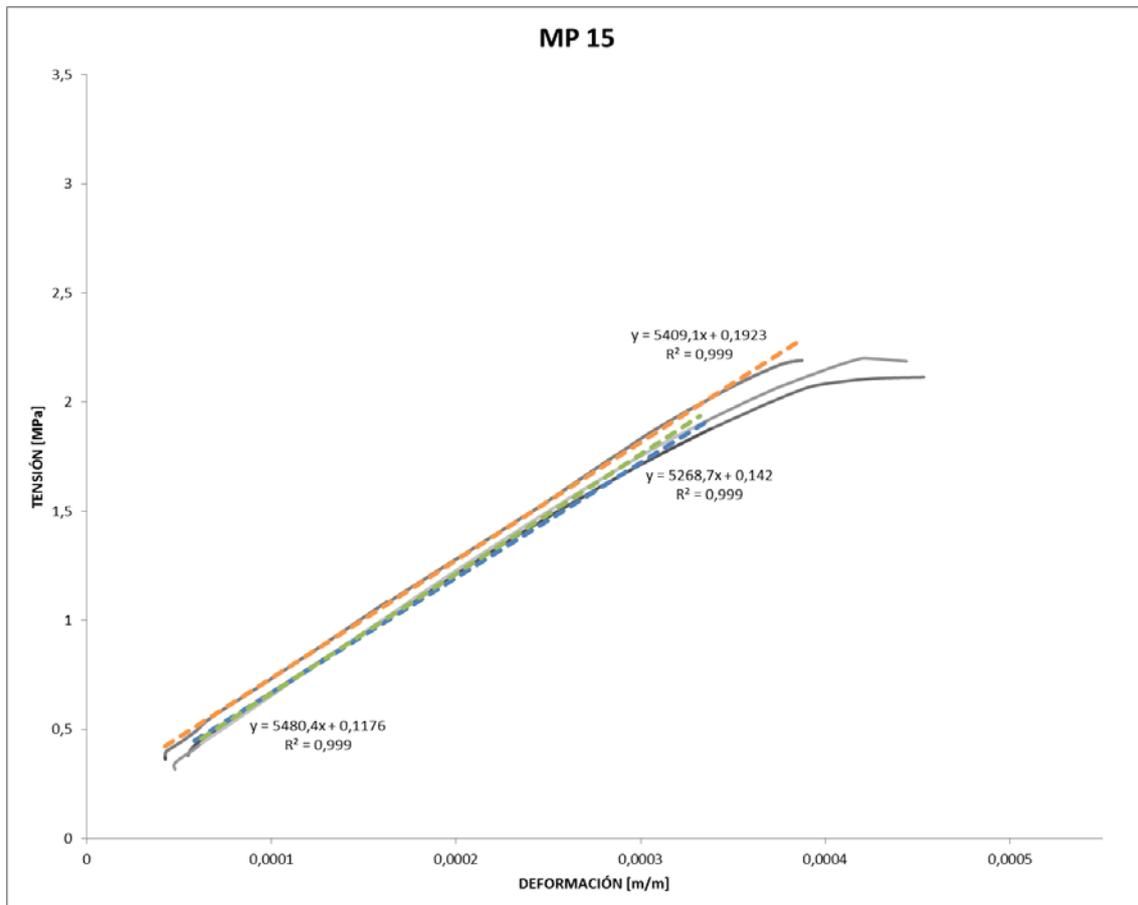
MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
MP15A		6,20	
MP15B	91	6,55	6,5 2,4%
MP15C		6,60	
		6,55	

Valores de Módulo de elasticidad.

MP 15-8 Módulo elástico bajo compresión.

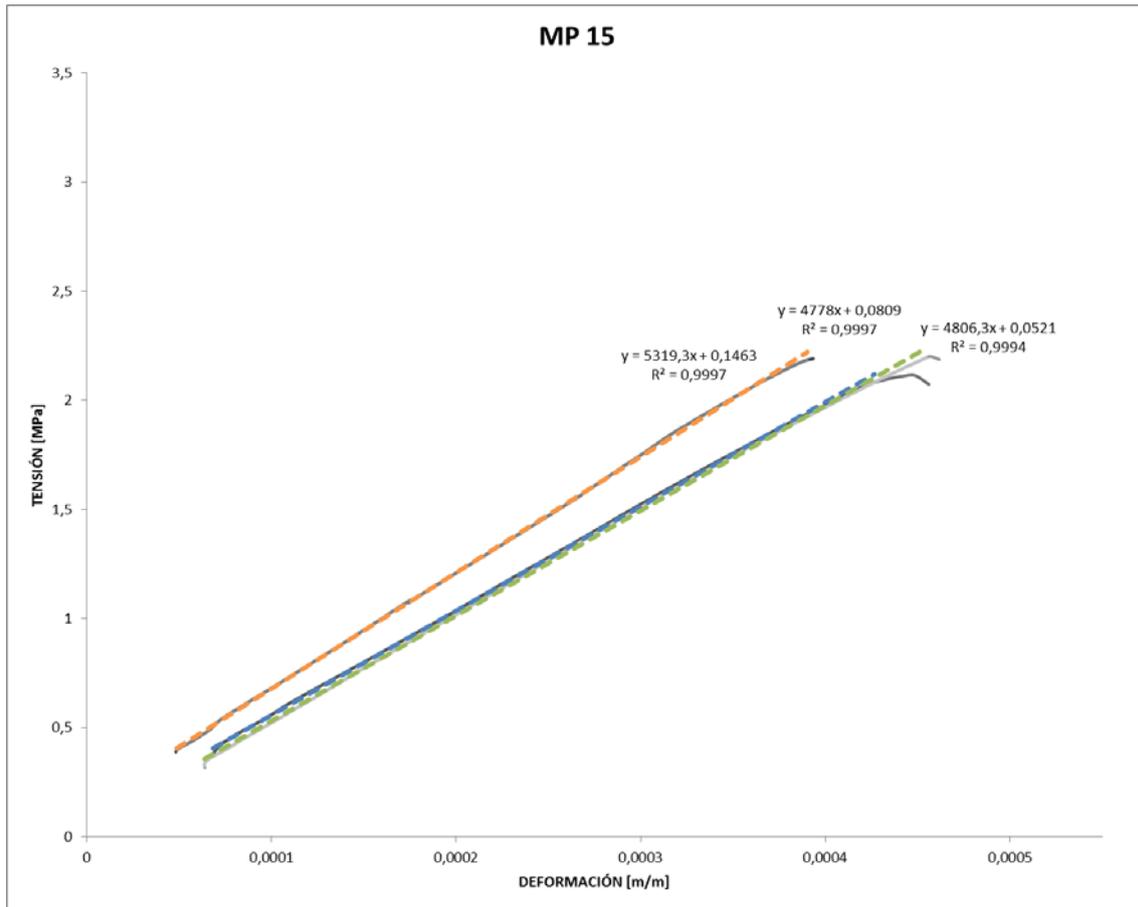
MUESTRA	EDAD [d]	E_m [MPa]	C.V.
MP15A		4550	
MP15B	94	4681 4604	1,5%
MP15C		4580	

MP 15-9 Curva tensión deformación y módulo elástico (flexotracción).



MUESTRA	EDAD [d]	E_m [MPa]	C.V.
MP15A		5269	
MP15B	91	5409 5386	2,0%
MP15C		5480	

MP 15-10 Curva tensión deformación y módulo elástico (compresión).



MUESTRA	EDAD [d]	E _m [MPa]	C.V.
MP15A		4778	
MP15B	91	5319 4968	6,1%
MP15C		4806	

MP 15-11 MOE longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MOElong [MPa]	C.V.
MP15A		4845	
MP15B	42	4849 4845	0,1%
MP15C		4840	

MP 15-13 MOE longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MOElong [MPa]	C.V.
MP15A		5049	
MP15B	91	5007 5039	0,6%
MP15C		5063	

MP 15-12 MOE de flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	MOEflex [MPa]	C.V.
MP15A		4797	
MP15B	42	4808	0,3%
MP15C		4819	

MP 15-14 MOE de flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	MOEflex [MPa]	C.V.
MP15A		4810	
MP15B	91	4927 4915	3,5%
MP15C		4767	
		5047	
		5179	

A.16. Serie MP 16

Fecha de amasado: 16 de diciembre de 2014

Fecha de rotura: 14 de Abril de 2015

Dimensiones 40x40x160 mm

Datos de ensayos.

MP 16-1 Deformación longitudinal de compresión.

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA 5%[kN]	CARGA 33%[kN]	ϵ 5%[$\mu\epsilon$]	ϵ 33%[$\mu\epsilon$]
MP16A				86	524
MP16B	119	0,60	4,00	92	517
MP16C				81	519

MP 16-2 Carga máxima (flexión en tres puntos).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP16A		0,89
MP16B	119	0,95
MP16C		0,87

MP 16-4 Frecuencia de resonancia longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP16A		0,3960	5656
MP16B	42	0,3957	5628
MP16C		0,3964	5648
MP16A		0,3960	5784
MP16B	119	0,3960	5816
MP16C		0,3960	5748

MP 16-3 Carga máxima (compresión).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP16A		11,27 10,50
MP16B	119	10,78 11,18
MP16C		10,46 11,18

MP 16-5 Frecuencia de resonancia transversal.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP16A		0,3960	2396 2400
MP16B	119	0,3960	2416
MP16C		0,3960	2340

Valores de resistencia.

MP 16-6 Flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
MP16A		2,10	
MP16B	119	2,20 2,1	3,6%
MP16C		2,05	

MP 16-7 Compresión.

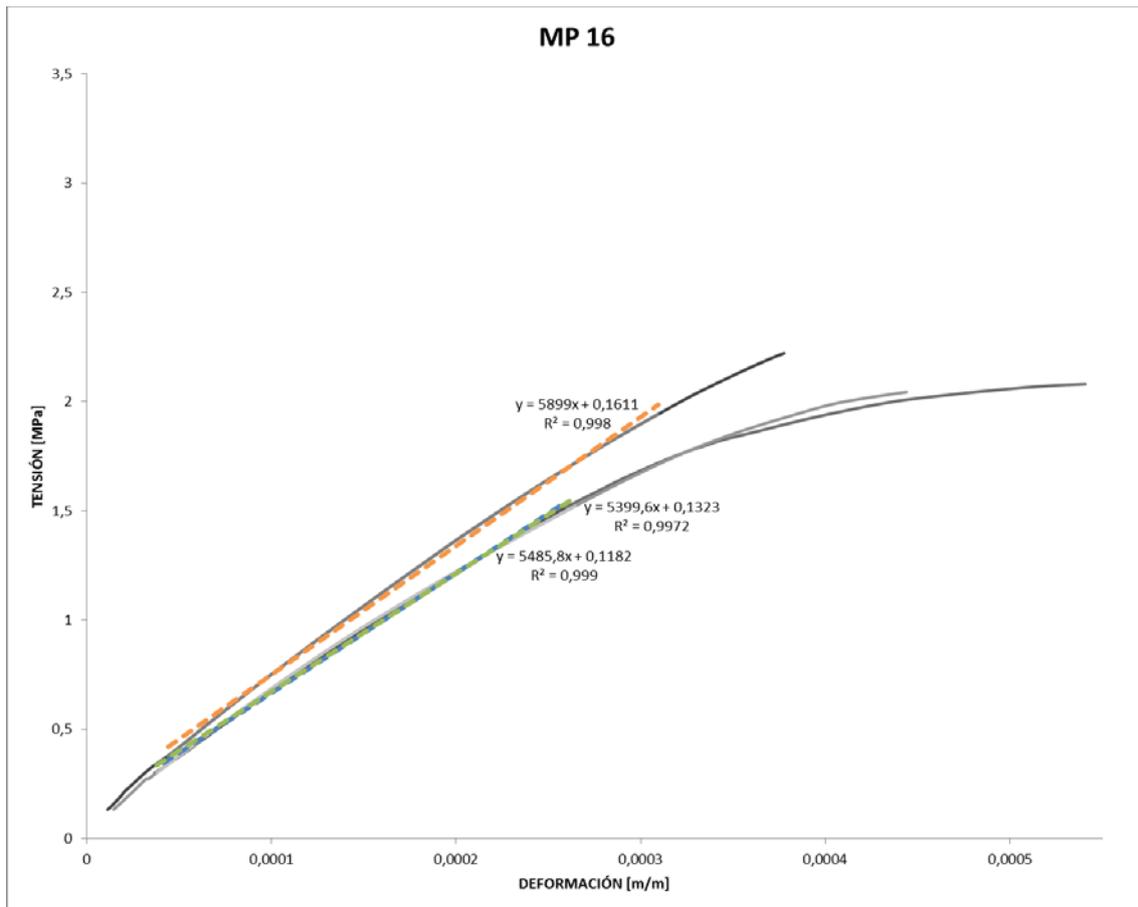
MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
MP16A		7,05 6,55	
MP16B	119	6,75 6,8	3,4%
MP16C		7,00 6,55 7,00	

Valores de Módulo de elasticidad.

MP 16-8 Módulo elástico bajo compresión.

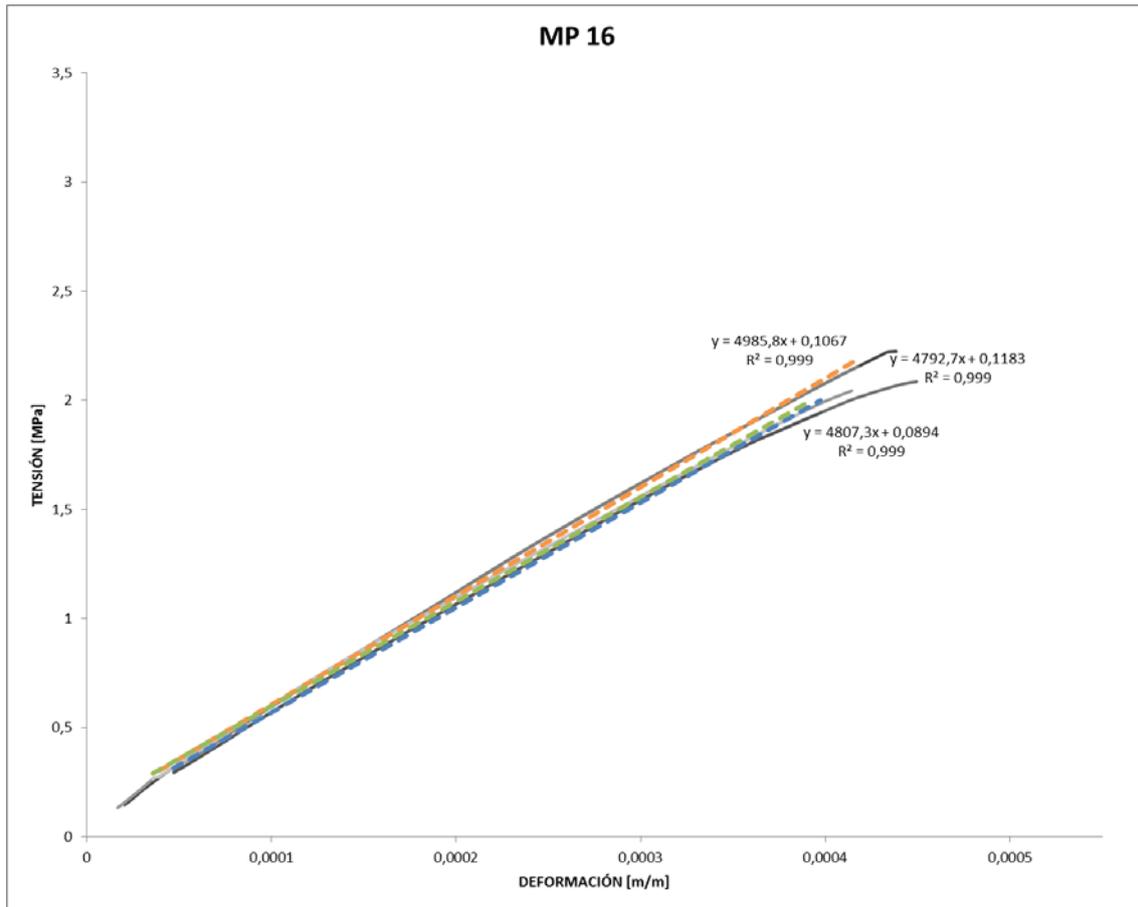
MUESTRA	EDAD [d]	E_m [MPa]	C.V.
MP16A		4852	
MP16B	119	5000 4901	1,7%
MP16C		4852	

MP 16-9 Curva tensión deformación y módulo elástico (flexotracción).



MUESTRA	EDAD [d]	E_m [MPa]	C.V.
MP16A		5486	
MP16B	119	5899 5595	4,8%
MP16C		5400	

MP 16-10 Curva tensión deformación y módulo elástico (compresión).



MUESTRA	EDAD [d]	E _m [MPa]	C.V.
MP16A		4807	
MP16B	119	4986 4862	2,2%
MP16C		4793	

MP 16-11 MOE longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MOElong [MPa]	C.V.
MP16A		5067	
MP16B	42	5013 5046	0,6%
MP16C		5058	

MP 16-13 MOE longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MOElong [MPa]	C.V.
MP16A		5299	
MP16B	119	5354 5296	1,1%
MP16C		5233	

MP 16-12 MOE de flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	MOEflex [MPa]	C.V.
MP16A		5215	
MP16B	42	4916 5065	4,2%
MP16C			

MP 16-14 MOE de flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	MOEflex [MPa]	C.V.
MP16A		4843	
MP16B	119	4855 4920 4797	2,4%
MP16C		4746 4619	

A.19. Serie MP 19

Fecha de amasado: 24 de marzo de 2015

Fecha de rotura: 21 de Abril de 2015

Dimensiones 40x20x160 mm

Datos de ensayos.

MP 19-1 Espesores.

MUESTRA	ESPESOR [m]
MP19A	0,0196
MP19B	0,0190
MP19C	0,0195

MP 1-4 Carga máxima (flexión en tres puntos).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP19A		0,72
MP19B	28	0,71
MP19C		0,70

MP 1-2 Frecuencia de resonancia longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP19A		0,1953	6572
MP19B	28	0,1867	6608
MP19C		0,1887	6556

MP 1-3 Frecuencia de resonancia transversal (t=40).

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP19A		0,1953	2676
MP19B	28	0,1867	2660
MP19C		0,1887	2616

MP 1-5 Frecuencia de resonancia transversal (t=20).

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP19A		0,1953	1480
MP19B	28	0,1867	1420
MP19C		0,1887	1440

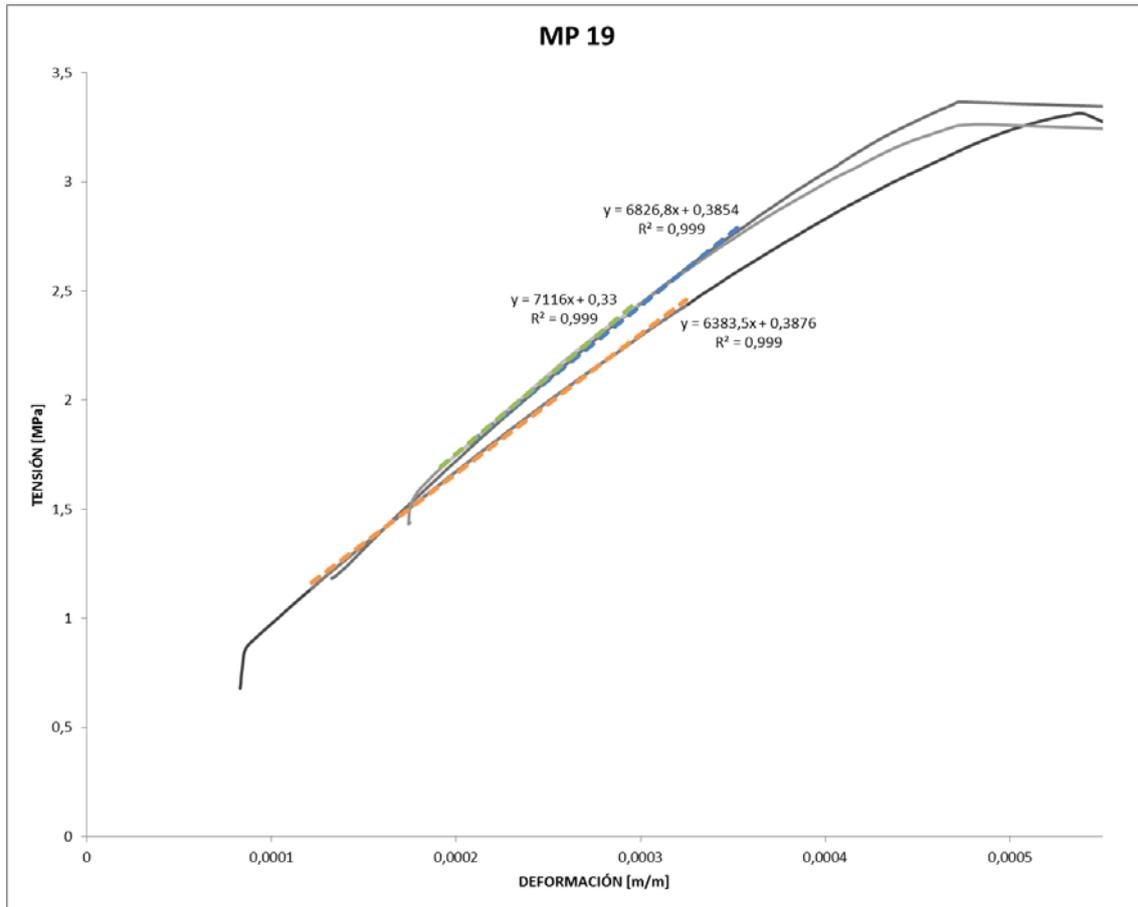
Valores de resistencia.

MP 1-6 Flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
MP19A		3,35	
MP19B	28	3,3	1,5%
MP19C		3,25	

Valores de Módulo de elasticidad.

MP 1-7 Curva tensión deformación y módulo elástico (flexotracción).



MUESTRA	EDAD [d]	E_m [MPa]	C.V.
MP19A		6827	
MP19B	28	6384 6776	5,4%
MP19C		7116	

MP 1-8 MOE longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MOElong [MPa]	C.V.
MP19A		6687	
MP19B	28	6787 6716	0,9%
MP19C		6675	

MP 1-9 MOE de flexión (t=40).

MUESTRA	EDAD [d]	MOEflex [MPa]	C.V.
MP19A		5941	
MP19B	28	5856 5819	2,5%
MP19C		5660	

MP 1-10 MOE de flexión (t=20).

MUESTRA	EDAD [d]	MOEflex [MPa]	C.V.
MP19A		5687	
MP19B	28	5646 5672	0,4%
MP19C		5683	

A.20. Serie MP 20

Fecha de amasado: 24 de marzo de 2015

Fecha de rotura: 21 de Abril de 2015

Dimensiones 40x15x160 mm

Datos de ensayos.

MP 20-1 Espesores.

MUESTRA	ESPESOR [m]
MP20A	0,0157
MP20B	0,0154
MP20C	0,0157

MP 20-4 Carga máxima (flexión en tres puntos).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP20A		0,63
MP20B	28	0,59
MP20C		0,57

MP 20-2 Frecuencia de resonancia longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP20A		0,1573	6636
MP20B	28	0,1575	6568
MP20C		0,1576	6616

MP 20-3 Frecuencia de resonancia transversal (t=40).

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP20A		0,1573	2656
MP20B	28	0,1575	2628
MP20C		0,1576	2664

MP 20-5 Frecuencia de resonancia transversal (t=15).

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP20A		0,1573	1196
MP20B	28	0,1575	1168
MP20C		0,1576	1196

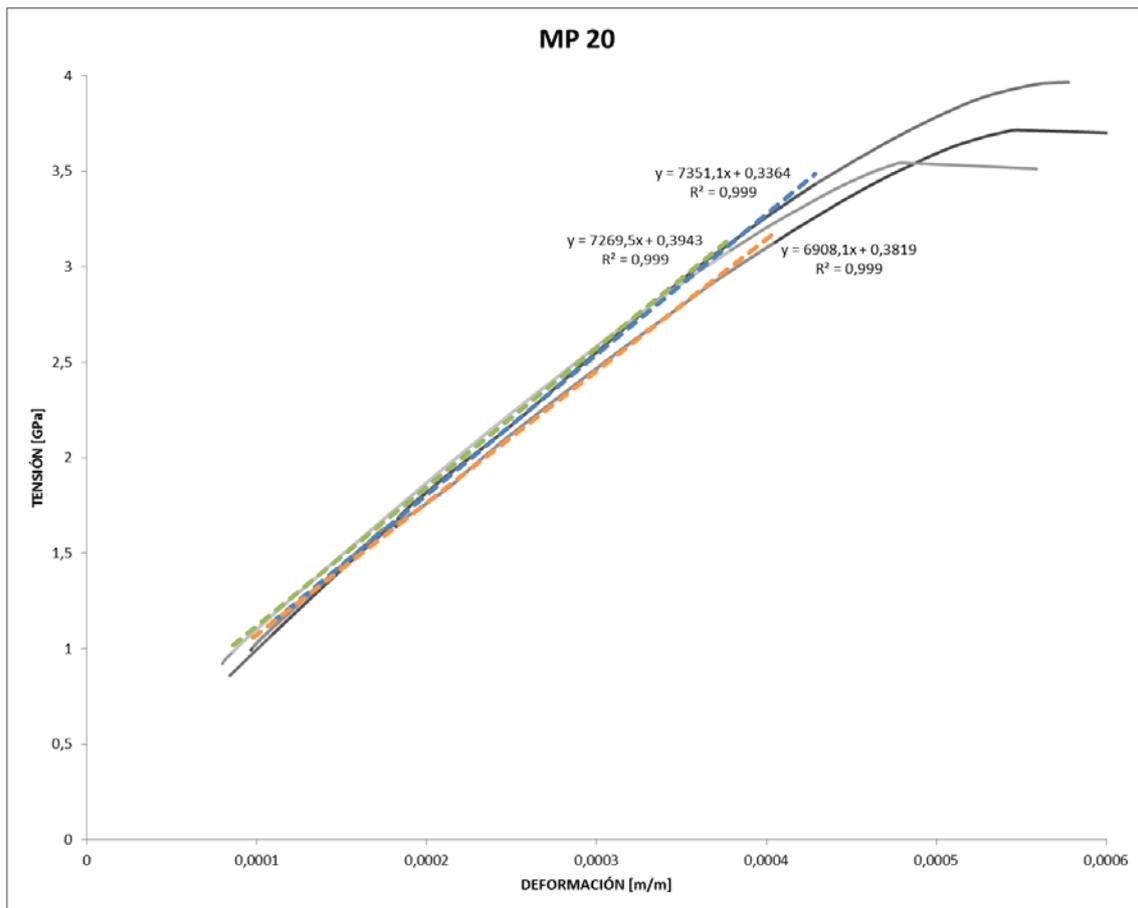
Valores de resistencia.

MP 20-6 Flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
MP20A		3,80	
MP20B	28	3,55 3,6	5,6%
MP20C		3,40	

Valores de Módulo de elasticidad.

MP 20-7 Curva tensión deformación y módulo elástico (flexotracción).



MUESTRA	EDAD [d]	E_m [MPa]	C.V.
MP20A		7351	
MP20B	28	6908	7176 3,3%
MP20C		7269	

MP 20-8 MOE longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MOElong [MPa]	C.V.
MP20A		6863	
MP20B	28	6782	6832 0,6%
MP20C		6851	

MP 20-9 MOE de flexión (t=40).

MUESTRA	EDAD [d]	MOEflex [MPa]	C.V.
MP20A		5855	
MP20B	28	5782	5851 1,1%
MP20C		5916	

MP 20-10 MOE de flexión (t=15).

MUESTRA	EDAD [d]	MOEflex [MPa]	C.V.
MP20A		5541	
MP20B	28	5406	5513 1,7%
MP20C		5591	

A.21. Serie MP 21

Fecha de amasado: 24 de marzo de 2015

Fecha de rotura: 16 de Junio de 2015

Dimensiones 40x20x160 mm

Datos de ensayos.

MP 21-1 Espesores.

MUESTRA	ESPESOR [m]
MP21A	0,0206
MP21B	0,0205
MP21C	0,0206

MP 21-2 Carga máxima (flexión en tres puntos).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP21A		0,83
MP21B	84	0,74
MP21C		0,77

MP 21-3 Frecuencia de resonancia longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP21A		0,2013	6840
MP21B	28	0,2002	6696
MP21C		0,2014	6812
MP21A		0,1986	6668
MP21B	56	0,1977	6388
MP21C		0,1990	6560
MP21A		0,1986	6696
MP21B	84	0,1976	6576
MP21C		0,1989	6628

MP 21-4 Frecuencia de resonancia transversal (t=40).

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP21A		0,2013	2724
MP21B	28	0,2002	2656
MP21C		0,2014	2696
MP21A		0,1986	2704
MP21B	56	0,1977	2640
MP21C		0,1990	2640
MP21A		0,1986	2616
MP21B	84	0,1976	2636
MP21C		0,1989	2692

MP 21-5 Frecuencia de resonancia transversal (t=20).

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP21A		0,2013	1576
MP21B	28	0,2002	1532
MP21C		0,2014	1564
MP21A		0,1986	1548
MP21B	56	0,1977	1440
MP21C		0,1990	1536
MP21A		0,1986	1544
MP21B	84	0,1976	1508
MP21C		0,1989	1524

Valores de resistencia.

MP 21-6 Flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
MP21A		3,80	
MP21B	84	3,40	3,6 5,8%
MP21C		3,50	

Valores de Módulo de elasticidad.

MP 21-7 MOE longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MOElong [MPa]	C.V.
MP21A		7068	
MP21B	28	6922	7046 1,6%
MP21C		7148	
MP21A		6825	
MP21B	56	6266	6570 4,3%
MP21C		6619	
MP21A		6883	
MP21B	84	6637	6758 1,8%
MP21C		6754	

MP 21-8 MOE de flexión (t=40).

MUESTRA	EDAD [d]	MOEflex [MPa]	C.V.
MP21A		6148	
MP21B	28	5789	5988 3,1%
MP21C		6026	
MP21A		5977	
MP21B	56	5699	5795 2,7%
MP21C		5709	
MP21A		5595	
MP21B	84	5679	5649 0,8%
MP21C		5672	

MP 21-9 MOE de flexión (t=20).

MUESTRA	EDAD [d]	MOEflex [MPa]	C.V.
MP21A		6087	
MP21B	28	5798	5961 2,5%
MP21C		5997	
MP21A		5794	
MP21B	56		5755 1,0%
MP21C		5716	
MP21A		5764	
MP21B	84	5545	5644 2,0%
MP21C		5624	

A.22. Serie MP 22

Fecha de amasado: 24 de marzo de 2015

Fecha de rotura: 16 de Junio de 2015

Dimensiones 40x15x160 mm

Datos de ensayos.

MP 22-1 Espesores.

MUESTRA	ESPESOR [m]
MP22A	0,0140
MP22B	0,0155
MP22C	0,0150

MP 22-2 Carga máxima (flexión en tres puntos).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP22A		0,63
MP22B	84	0,62
MP22C		0,62

MP 22-3 Frecuencia de resonancia longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP22A		0,1436	6476
MP22B	28	0,1568	6576
MP22C		0,1520	6588
MP22A		0,1432	6528
MP22B	56	0,1559	6532
MP22C		0,1512	6580
MP22A		0,1430	6500
MP22B	84	0,1559	6560
MP22C		0,1510	6572

MP 22-4 Frecuencia de resonancia transversal (t=40).

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP22A		0,1436	2596
MP22B	28	0,1568	2620
MP22C		0,1520	2648
MP22A		0,1432	2592
MP22B	56	0,1559	2592
MP22C		0,1512	2616
MP22A		0,1430	2628
MP22B	84	0,1559	2636
MP22C		0,1510	2660

MP 22-5 Frecuencia de resonancia transversal (t=15).

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP22A		0,1436	1040
MP22B	28	0,1568	1180
MP22C		0,1520	1140
MP22A		0,1432	1036
MP22B	56	0,1559	1168
MP22C		0,1512	1136
MP22A		0,1430	1048
MP22B	84	0,1559	1176
MP22C		0,1510	1144

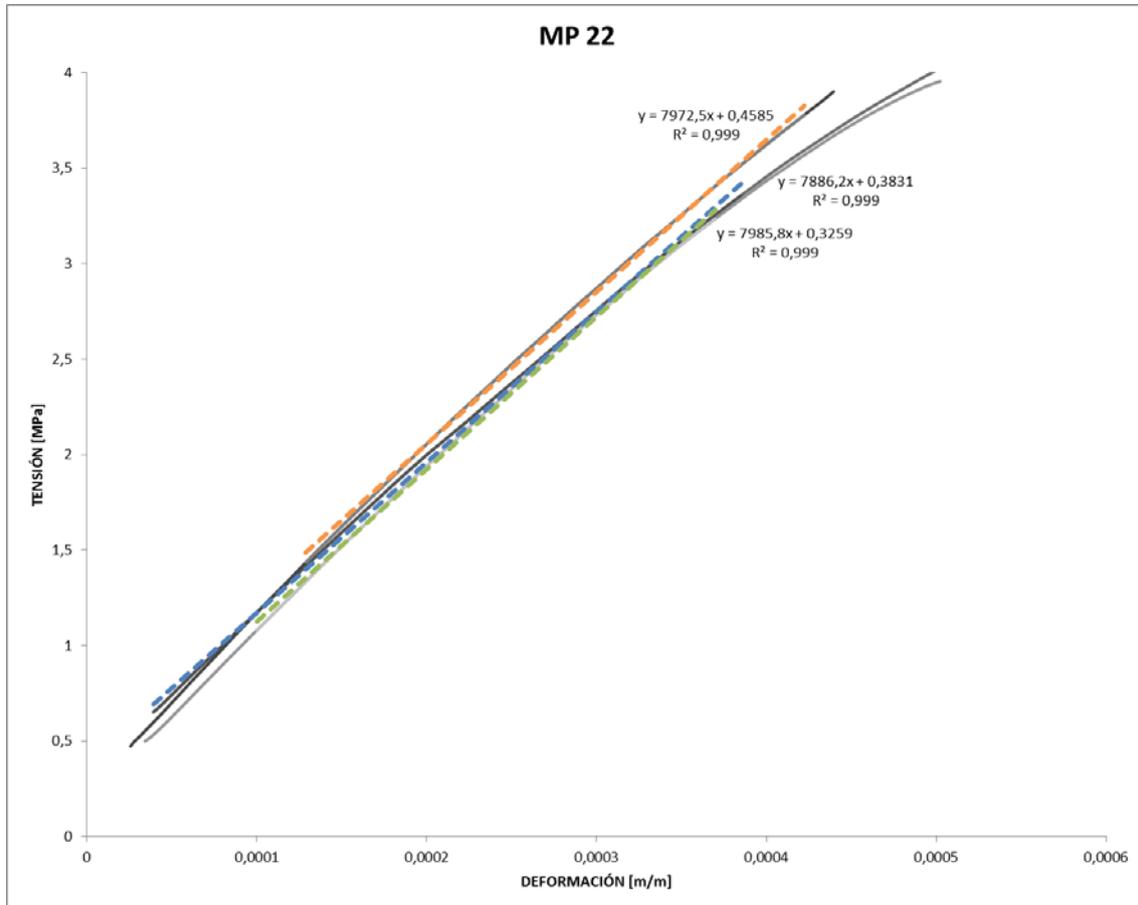
Valores de resistencia.

MP 22-6 Flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
MP22A		3,95	
MP22B	84	3,90	3,9 0,7%
MP22C		3,90	

Valores de Módulo de elasticidad.

MP 22-7 Curva tensión deformación y módulo elástico (flexotracción).



MUESTRA	EDAD [d]	E_m [MPa]	C.V.
MP22A		7886	
MP22B	84	7972 7948	0,7%
MP22C		7986	

Datos y resultados.

MP 22-8 MOE longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MOElong [MPa]	C.V.
MP22A		6645	
MP22B	28	6833	6792 1,9%
MP22C		6899	
MP22A		6734	
MP22B	56	6736	6772 0,9%
MP22C		6846	
MP22A		6667	
MP22B	84	6794	6760 1,2%
MP22C		6820	

MP 22-9 MOE de flexión (t=15).

MUESTRA	EDAD [d]	MOEflex [MPa]	C.V.
MP22A		5219	
MP22B	28	5726	5543 5,1%
MP22C		5683	
MP22A		5164	
MP22B	56	5578	5452 4,6%
MP22C		5614	
MP22A		5277	
MP22B	84	5655	5539 4,1%
MP22C		5686	

MP 22-10 MOE de flexión (t=40).

MUESTRA	EDAD [d]	MOEflex [MPa]	C.V.
MP22A		5687	
MP22B	28	5805	5809 2,1%
MP22C		5936	
MP22A		5654	
MP22B	56	5649	5688 1,1%
MP22C		5763	
MP22A		5804	
MP22B	84	5842	5865 1,3%
MP22C		5950	

A.23. Serie MP 23

Fecha de amasado: 24 de marzo de 2015

Fecha de rotura: 19 de mayo de 2015

Dimensiones 40x40x160 mm

Datos de ensayos.

MP 23-1 Deformación longitudinal de compresión.

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA 5%[kN]	CARGA 33%[kN]	ϵ 5%[$\mu\epsilon$]	ϵ 33%[$\mu\epsilon$]
MP23A				101	497
MP23B	56	0,60	4,00	87	473
MP23C				87	477

MP 23-2 Carga máxima (flexión en tres puntos).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP23A		1,32
MP23B	56	1,22
MP23C		1,21

MP 23-3 Carga máxima (compresión).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP23A		11,16
MP23B	56	12,13
MP23C		12,32
		12,24
		12,96
		12,59

MP 23-4 Frecuencia de resonancia longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP23A		0,3915	6540
MP23B	28	0,4004	6592
MP23C		0,3998	6620
MP23A		0,3798	6204
MP23B	56	0,3884	6288
MP23C		0,3878	6316

MP 23-5 Frecuencia de resonancia transversal.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP23A		0,3915	2692
MP23B	28	0,4004	2720
MP23C		0,3998	2692
			2700
			2744
			2736
			2556
			2608
			2632

Valores de resistencia.

MP 23-6 Flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
MP23A		3,10	
MP23B	56	2,85 2,9	4,9%
MP23C		2,85	

MP 23-7 Compresión.

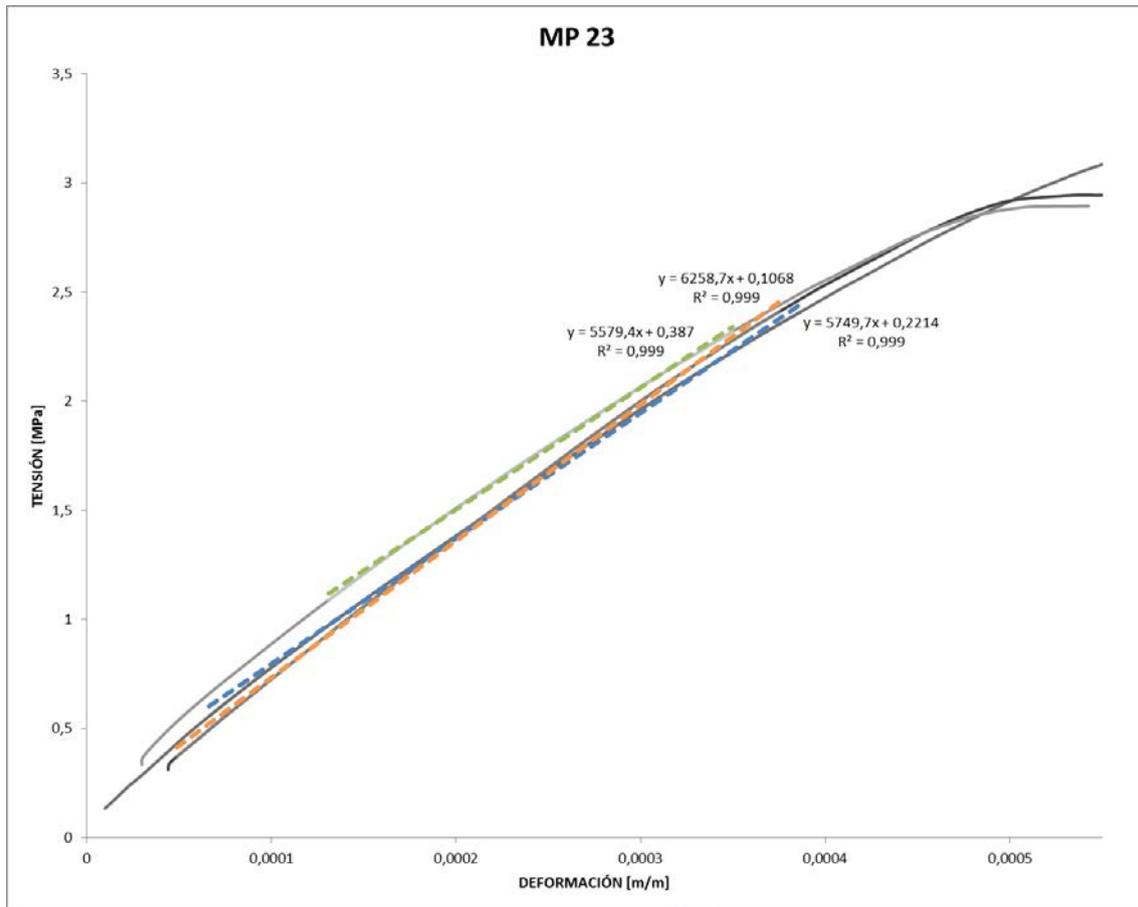
MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
MP23A		6,95	
MP23B	56	7,60	
		7,70	
		7,65	7,6 5,0%
		8,10	
		7,85	

Valores de Módulo de elasticidad.

MP 23-8 Módulo elástico bajo compresión.

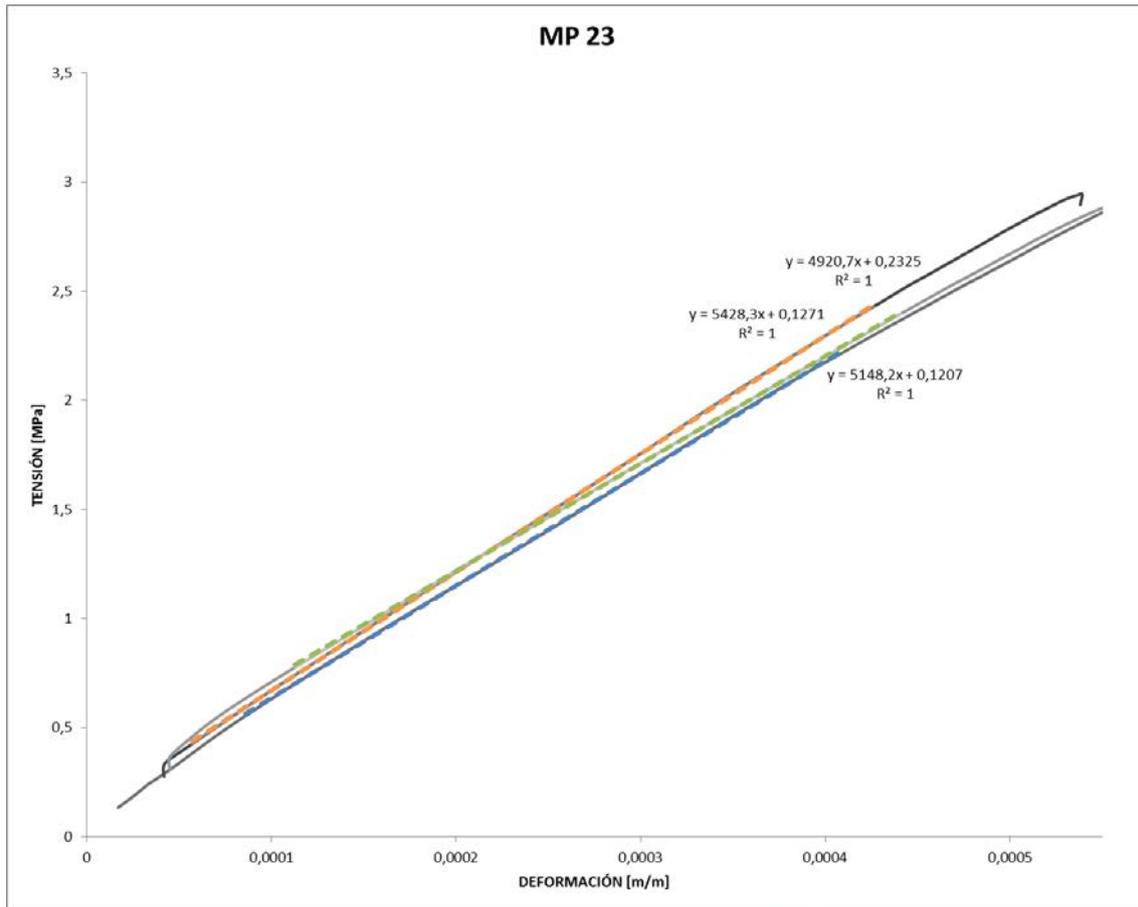
MUESTRA	EDAD [d]	E_m [MPa]	C.V.
MP23A		5366	
MP23B	56	5505 5440	1,3%
MP23C		5449	

MP 23-9 Curva tensión deformación y módulo elástico (flexotracción).



MUESTRA	EDAD [d]	E_m [MPa]	C.V.
MP23A		5750	
MP23B	56	6259 5863	6,0%
MP23C		5579	

MP 23-10 Curva tensión deformación y módulo elástico (compresión).



MUESTRA	EDAD [d]	E_m [MPa]	C.V.
MP23A		5148	
MP23B	56	4921	4,9%
MP23C		5428	

MP 23-11 MOE longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MOElong [MPa]	C.V.
MP23A		6725	
MP23B	28	6901	1,9%
MP23C		6975	
MP23A		5921	
MP23B	56	6143	2,4%
MP23C		6188	

MP 23-12 MOE de flexión (t=40).

MUESTRA	EDAD [d]	MOEflex [MPa]	C.V.
MP23A		6120	
MP23A		6363	
MP23B	28	6181	2,3%
MP23B		6218	
MP23C		6413	
MP23C		6488	
MP23A		5767	
MP23B	56	5668	2,2%
MP23C		5523	

A.24. Serie MP 24

Fecha de amasado: 24 de marzo de 2015

Fecha de rotura: 16 de junio de 2015

Dimensiones 40x40x160 mm

Datos de ensayos.

MP 24-1 Deformación longitudinal de compresión.

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA 5%[kN]	CARGA 33%[kN]	ϵ 5%[$\mu\epsilon$]	ϵ 33%[$\mu\epsilon$]
MP24A				106	565
MP24B	84	0,60	4,00	97	551
MP24C				86	523

MP 24-2 Carga máxima (flexión en tres puntos).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP24A		1,27
MP24B	84	0,97
MP24C		1,13

MP 24-3 Carga máxima (compresión).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP24A		10,71
MP24B	84	10,26
MP24C		9,99
MP24B		10,70
MP24C		11,05
MP24C		10,92

MP 24-4 Frecuencia de resonancia longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP24A		0,3887	6196
MP24B	28	0,3847	6184
MP24C		0,3933	6308
MP24A		0,3770	5868
MP24B	56	0,3764	5840
MP24C		0,3787	5912
MP24A		0,3764	5924
MP24B	84	0,3755	5860
MP24C		0,3776	5872

MP 24-5 Frecuencia de resonancia longitudinal¹.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP24A		0,3770	5992
MP24B	56	0,3764	5956
MP24C		0,3787	6048
MP24A		0,3764	6020
MP24B	84	0,3755	5948
MP24C		0,3776	6044

¹ Medición realizada con acelerómetro uniaxial.

MP 24-6 Frecuencia de resonancia de torsión¹.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP24A		0,3770	3508
MP24B	56	0,3764	3564
MP24C		0,3787	3552
MP24A		0,3764	3560
MP24B	84	0,3755	3508
MP24C		0,3776	3576

MP 24-7 Frecuencia de resonancia transversal.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP24A		0,3887	2508
			2536
MP24B	28	0,3847	2540
			2572
MP24C		0,3933	2596
			2632
MP24A		0,3770	2428
			2432
MP24B	56	0,3764	2432
			2456
MP24C		0,3787	2464
			2516
MP24A		0,3764	2464
MP24B	84	0,3755	2444
MP24C		0,3776	2484

MP 24-9 Frecuencia de resonancia transversal¹.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP24A		0,3770	2576
MP24B	56	0,3764	2552
MP24C		0,3787	2600
MP24A		0,3764	2584
MP24B	84	0,3755	2580
MP24C		0,3776	2644

Valores de resistencia.

MP 24-8 Flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
MP24A		2,95	
MP24B	84	2,25	2,6 13,4%
MP24C		2,65	

MP 24-10 Compresión.

MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
MP24A		6,70	
		6,40	
MP24B	84	6,25	6,6 3,9%
		6,70	
MP24C		6,90	
		6,85	

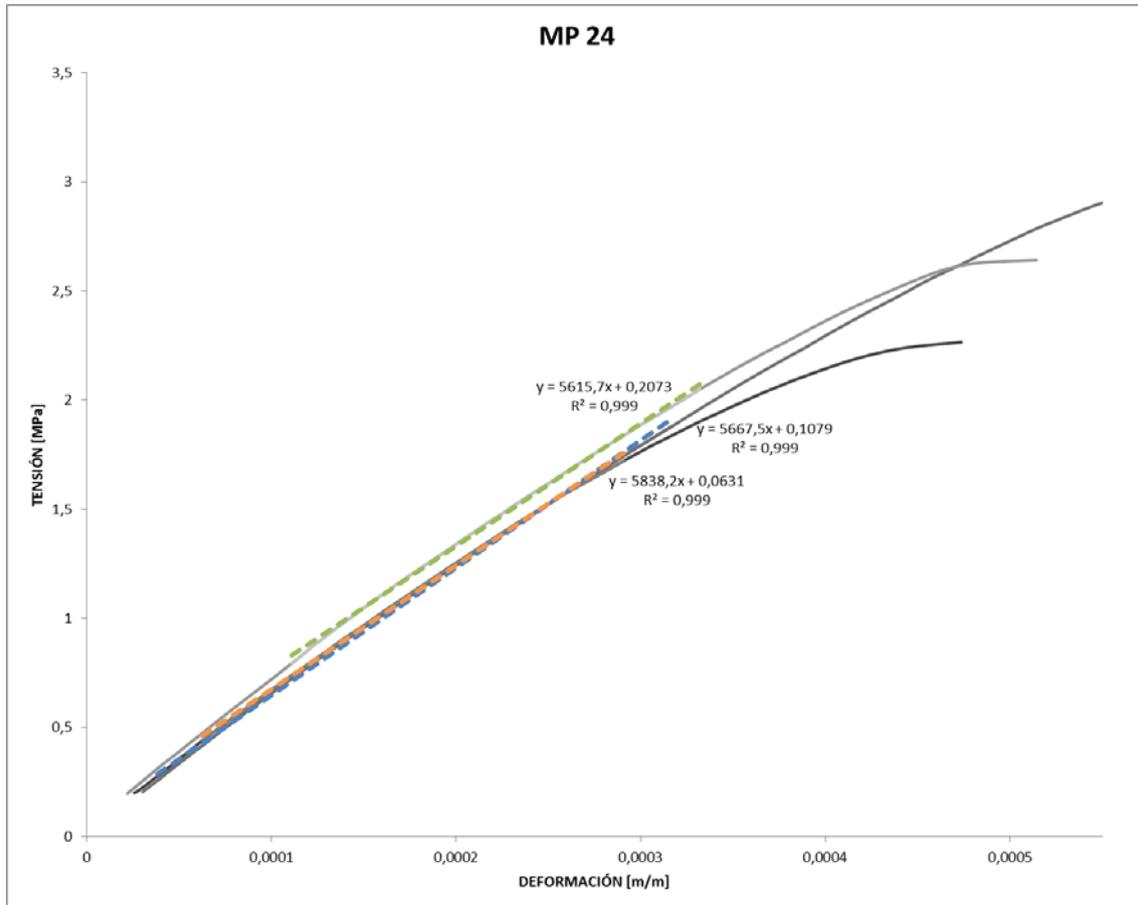
¹ Medición realizada con acelerómetro uniaxial

Valores de Módulo de elasticidad.

MP 24-11 Módulo elástico bajo compresión.

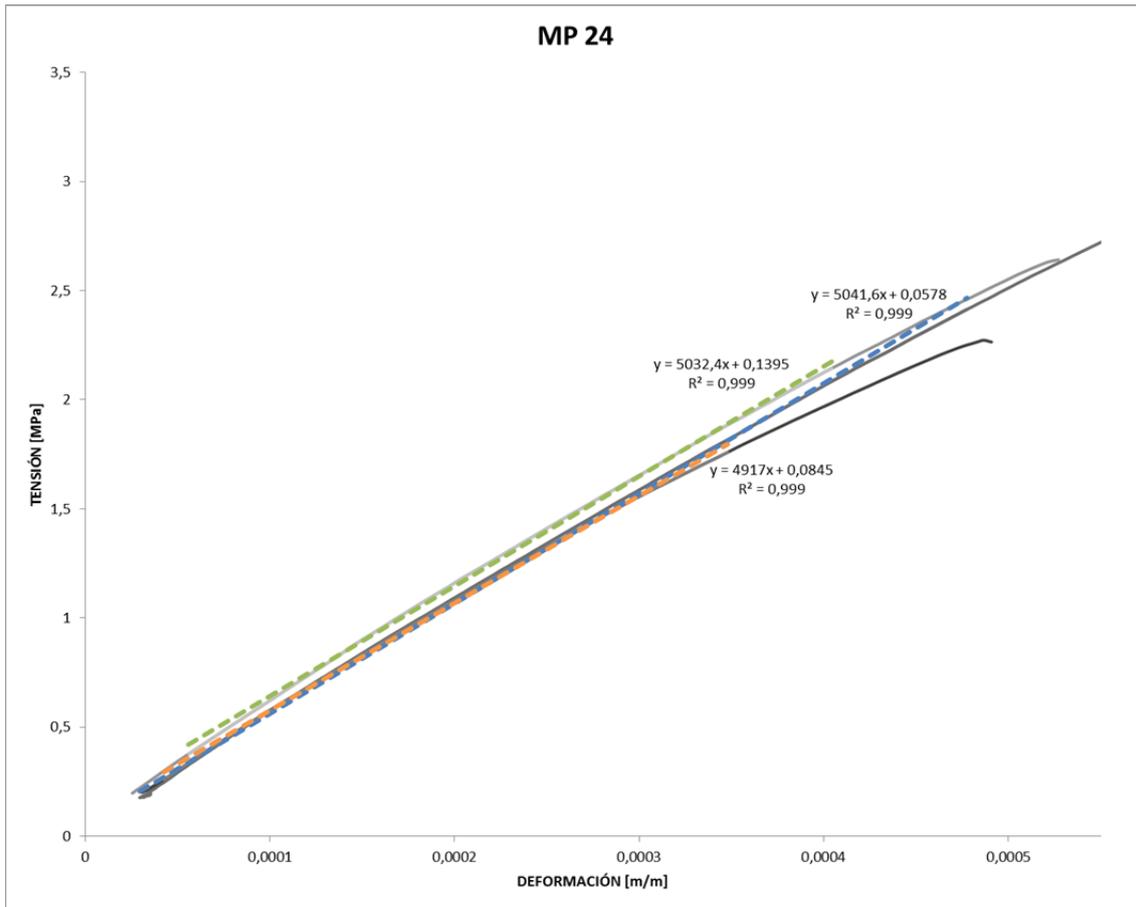
MUESTRA	EDAD [d]	E_m [MPa]	C.V.
MP24A		4630	
MP24B	84	4681 4724	2,6%
MP24C		4863	

MP 24-12 Curva tensión deformación y módulo elástico (flexotracción).



MUESTRA	EDAD [d]	E_m [MPa]	C.V.
MP24A		5667	
MP24B	84	5838 5707	2,0%
MP24C		5616	

MP 24-13 Curva tensión deformación y módulo elástico (compresión).



MUESTRA	EDAD [d]	E _m [MPa]	C.V.
MP24A		5042	
MP24B	84	4917 4997	1,4%
MP24C		5032	

MP 24-14 MOE longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MOE _{long} [MPa]	C.V.
MP24A		6014	
MP24B	28	5959 6078	2,6%
MP24C		6260	
MP24A		5232	
MP24B	56	5200 5242	0,9%
MP24C		5294	
MP24A		5324	
MP24B	84	5197 5256	1,2%
MP24C		5247	

MP 24-15 MOE longitudinal¹.

MUESTRA	EDAD [d]	MOE _{long} [MPa]	C.V.
MP24A		5414	
MP24B	56	5341 5432	1,9%
MP24C		5541	
MP24A		5456	
MP24B	84	5314 5429	1,9%
MP24C		5517	

¹ Medición realizada con acelerómetro uniaxial.

Datos y resultados.

MP 24-16 MOE de flexión

MUESTRA	EDAD [d]	MOE _{flex} [MPa]	C.V.
MP24A		5208	
		5325	
MP24B	28	5287	5449 4,2%
		5421	
MP24C		5646	
		5804	
MP24A		4734	
		4750	
MP24B	56	4742	4845 3,0%
		4836	
MP24C		4898	
		5107	
MP24A		4868	
MP24B	84	4778	4870 1,9%
MP24C		4963	

MP 24-17 MOE de flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	MOE _{flex} [MPa]	C.V.
MP24A		5329	
MP24B	56	5222	5335 2,2%
MP24C		5453	
MP24A		5354	
MP24B	84	5324	5434 3,0%
MP24C		5623	

Valores de Módulo de deformación transversal.

MP 24-18 G dinámico.

MUESTRA	EDAD [d]	Gdinamico [MPa]	C.V.
MP24A		2212	
MP24B	56	2291	2255 1,8%
MP24C		2261	
MP24A		2274	
MP24B	84	2214	2258 1,7%
MP24C		2285	

Valores de coeficiente de Poisson.

MP 24-19 ν .

MUESTRA	EDAD [d]	ν	C.V.
MP24A		0,233	
MP24B	56	0,180	0,21 13,4%
MP24C		0,225	
MP24A		0,209	
MP24B	84	0,215	0,21 2,0%
MP24C		0,207	

A.27. Serie MP 27

Fecha de amasado: 31 de marzo de 2015

Fecha de rotura: 21 de julio de 2015

Dimensiones 40x20x160 mm

Datos de ensayos.

MP 27-1 Espesores.

MUESTRA	ESPESOR [m]
MP27A	0,0193
MP27B	0,0202
MP27C	0,0192

MP 1-2 Carga máxima (flexión en tres puntos).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP27A		0,64
MP27B	112	0,64
MP27C		0,61

MP 1-3 Frecuencia de resonancia longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP27A		0,1853	6016
MP27B	28	0,1973	6236
MP27C		0,1925	6224
MP27A		0,1820	5860
MP27B	112	0,1920	5980
MP27C		0,1870	5940

MP 1-4 Frecuencia de resonancia transversal (t=40).

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP27A		0,1853	2360
MP27B	28	0,1973	2496
MP27C		0,1925	2500
MP27A		0,1820	2348
MP27B	112	0,1920	2444
MP27C		0,1870	2432

MP 1-5 Frecuencia de resonancia transversal (t=20).

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP27A		0,1853	1304
MP27B	28	0,1973	1428
MP27C		0,1925	1360
MP27A		0,1820	1272
MP27B	112	0,1920	1368
MP27C		0,1870	1312

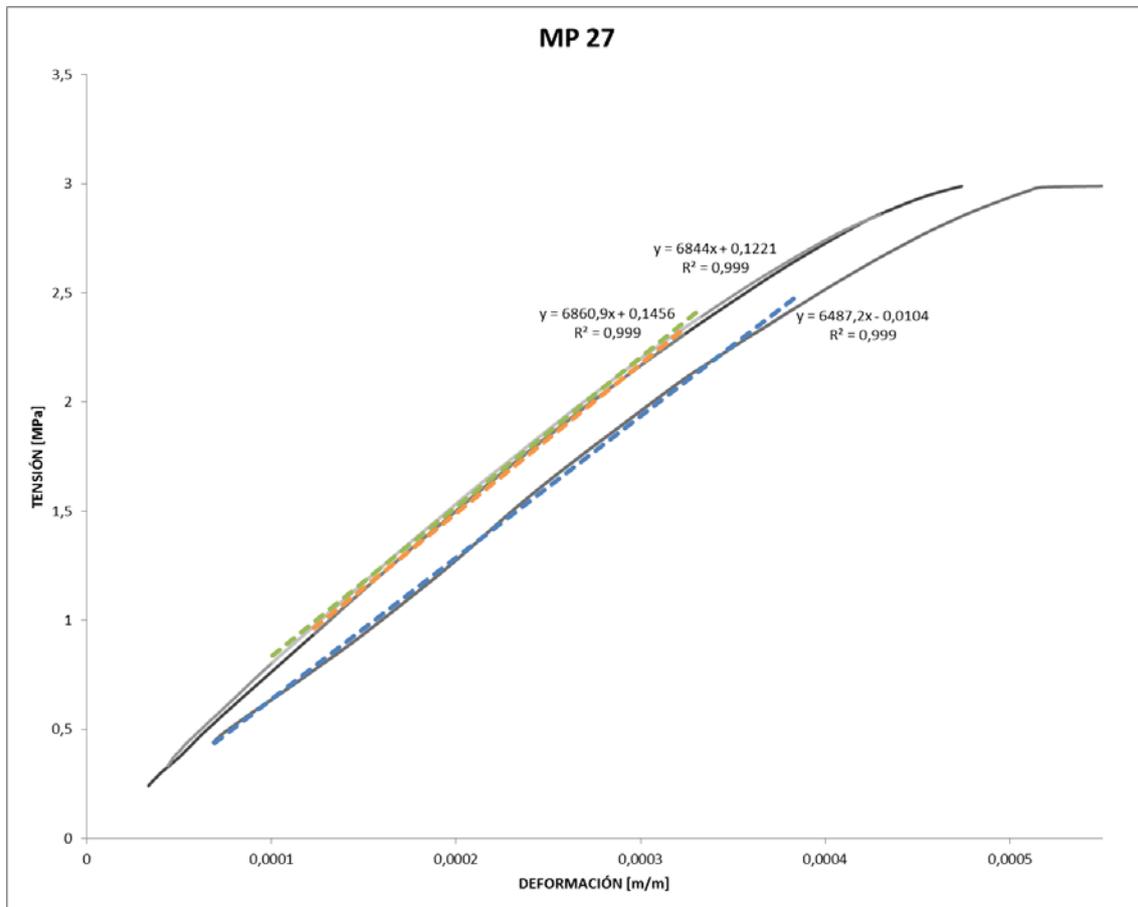
Valores de resistencia.

MP 1-6 Flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
MP27A		3,10	
MP27B	112	2,95 3,0	2,5%
MP27C		3,00	

Valores de Módulo de elasticidad.

MP 1-7 Curva tensión deformación y módulo elástico (flexotracción).



MUESTRA	EDAD [d]	E_m [MPa]	C.V.
MP27A		6487	
MP27B	112	6844	6731 3,1%
MP27C		6861	

MP 1-8 MOE longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MOElong [MPa]	
MP27A		5618	
MP27B	28	6047	5897
MP27C		6026	
MP27A		5235	
MP27B	105	5412	5326
MP27C		5332	

MP 1-9 MOE de flexión (t=40).

MUESTRA	EDAD [d]	MOEflex [MPa]	C.V.
MP27A		4604	
MP27B	28	5159	4980 6,5%
MP27C		5178	
MP27A		4476	
MP27B	105	4814	4683 3,9%
MP27C		4760	

MP 1-10 MOE de flexión (t=20).

MUESTRA	EDAD [d]	MOEflex [MPa]	C.V.
MP27A		4810	
MP27B	28	5173	4965 3,8%
MP27C		4911	
MP27A		4495	
MP27B	105	4620	4518 2,0%
MP27C		4440	

A.28. Serie MP 28

Fecha de amasado: 31 de marzo de 2015

Fecha de rotura: 21 de julio de 2015

Dimensiones 40x15x160 mm

Datos de ensayos.

MP 28-1 Espesores.

MUESTRA	ESPESOR [m]
MP28A	0,0150
MP28B	0,0145
MP28C	0,0136

MP 28-2 Carga máxima (flexión en tres puntos).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP28A		0,55
MP28B	112	0,51
MP28C		0,47

MP 28-3 Frecuencia de resonancia longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP28A		0,1493	6236
MP28B	28	0,1468	6208
MP28C		0,1390	6092
MP28A		0,1450	6008
MP28B	112	0,1420	5948
MP28C		0,1360	5844

MP 28-4 Frecuencia de resonancia transversal (t=40).

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP28A		0,1493	2504
MP28B	28	0,1468	2488
MP28C		0,1390	2436
MP28A		0,1450	2420
MP28B	112	0,1420	2400
MP28C		0,1360	2372

MP 28-5 Frecuencia de resonancia transversal (t=15).

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP28A		0,1493	1088
MP28B	28	0,1468	1044
MP28C		0,1390	964
MP28A		0,1450	1044
MP28B	112	0,1420	1000
MP28C		0,1360	920

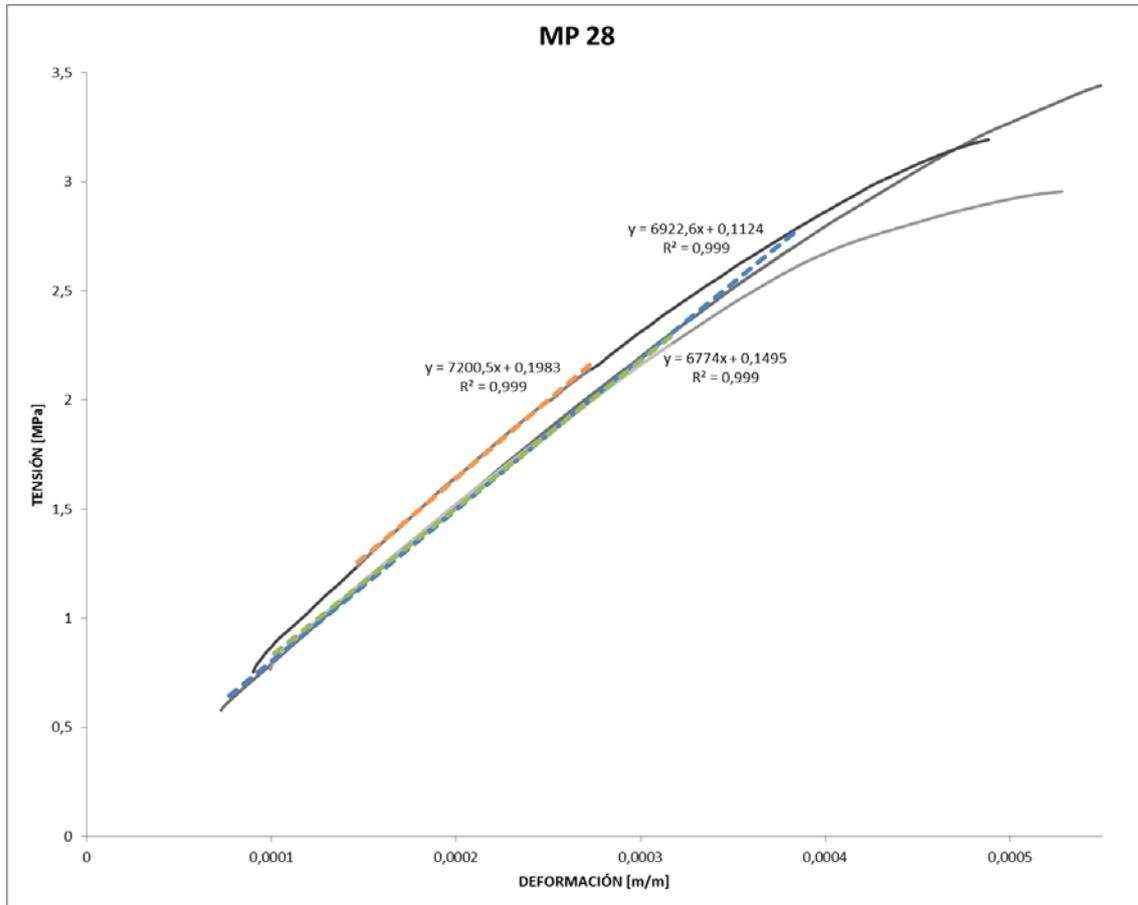
Valores de resistencia.

MP 28-6 Flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
MP28A		3,45	
MP28B	112	3,30	3,3 3,1%
MP28C		3,25	

Valores de Módulo de elasticidad.

MP 28-7 Curva tensión deformación y módulo elástico (flexotracción).



MUESTRA	EDAD [d]	E_m [MPa]	C.V.
MP28A		6923	
MP28B	112	7200	3,1%
MP28C		6774	

Datos y resultados.

MP 28-8 MOE longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MOElong [MPa]	
MP28A		6112	
MP28B	28	6243	6173
MP28C		6165	
MP28A		5509	
MP28B	105	5543	5506
MP28C		5464	

MP 28-9 MOE de flexión (t=40).

MUESTRA	EDAD [d]	MOEflex [MPa]	C.V.
MP28A		5248	
MP28B	28	5340	5252 1,6%
MP28C		5168	
MP28A		4760	
MP28B	105	4806	4787 0,5%
MP28C		4794	

MP 28-10 MOE de flexión (t=15).

MUESTRA	EDAD [d]	MOEflex [MPa]	C.V.
MP28A		5182	
MP28B	28	5376	5262 1,9%
MP28C		5227	
MP28A		4634	
MP28B	105	4771	4688 1,6%
MP28C		4658	

A.29. Serie MP 29

Fecha de amasado: 31 de marzo de 2015

Fecha de rotura: 26 de mayo de 2015

Dimensiones 40x20x160 mm

Datos de ensayos.

MP 29-1 Espesores.

MUESTRA	ESPESOR [m]
MP29A	0,0180
MP29B	0,0199
MP29C	0,0197

MP 29-2 Carga máxima (flexión en tres puntos).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP29A		0,65
MP29B	56	0,57
MP29C		0,63

MP 29-3 Frecuencia de resonancia longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP29A		0,1756	6048
MP29B	28	0,1961	6224
MP29C		0,1899	6240
MP29A		0,1740	5940
MP29B	56	0,1914	5932
MP29C		0,1861	5924

MP 29-4 Frecuencia de resonancia transversal (t=40).

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP29A		0,1756	2456
MP29B	28	0,1961	2516
MP29C		0,1899	2504
MP29A		0,1740	2372
MP29B	56	0,1914	2440
MP29C		0,1861	2404

MP 29-5 Frecuencia de resonancia transversal (t=20).

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP29A		0,1756	1248
MP29B	28	0,1961	1412
MP29C		0,1899	1384
MP29A		0,1740	1232
MP29B	56	0,1914	1372
MP29C		0,1861	1344

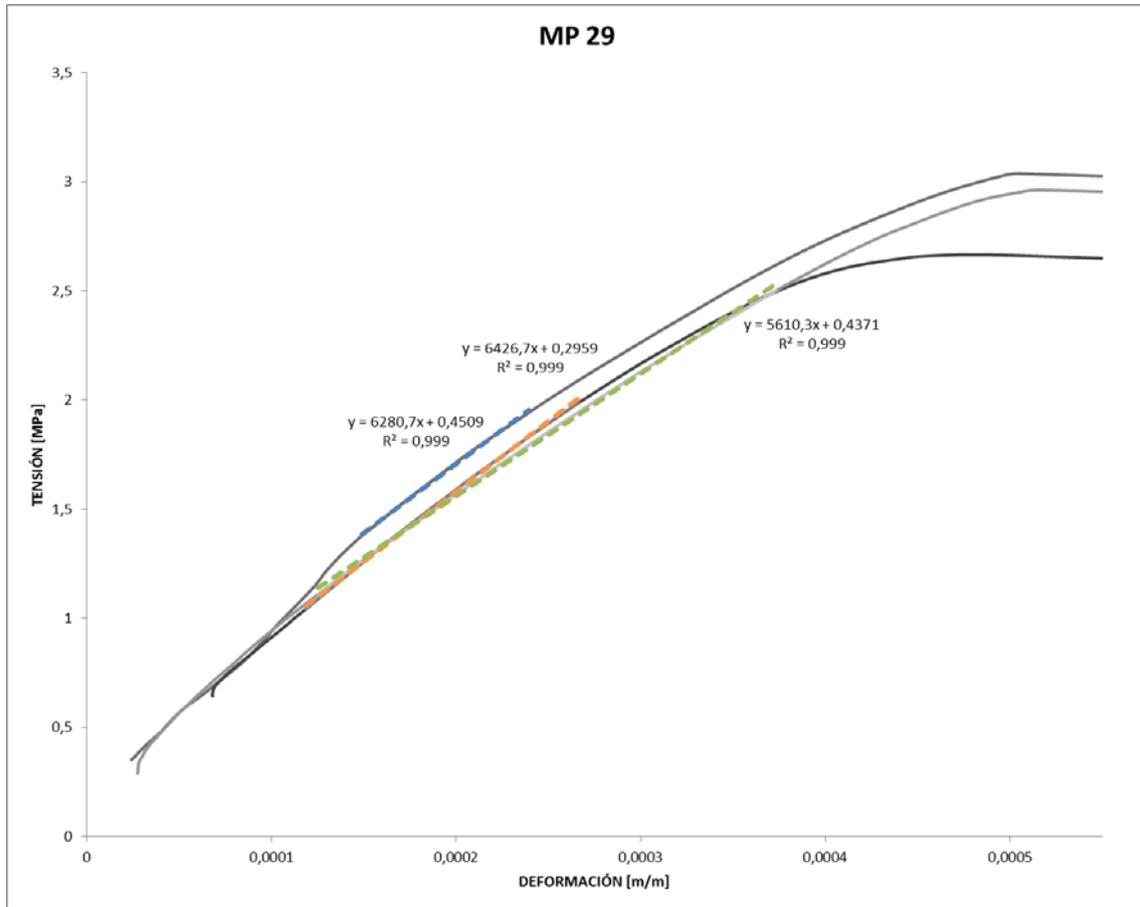
Valores de resistencia.

MP 29-6 Flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
MP29A		3,40	
MP29B	56	2,70	3,0 11,6%
MP29C		3,00	

Valores de Módulo de elasticidad.

MP 29-7 Curva tensión deformación y módulo elástico (flexotracción).



MUESTRA	EDAD [d]	Em [MPa]	C.V.
MP29A		6281	
MP29B	56	6427	6106 7,1%
MP29C		5610	

MP 29-8 MOE longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MOElong [MPa]	
MP29A		5585	
MP29B	28	6017	5869
MP29C		6005	
MP29A		5339	
MP29B	56	5335	5326
MP29C		5304	

MP 29-9 MOE de flexión (t=40).

MUESTRA	EDAD [d]	MOEflex [MPa]		C.V.
MP29A		4905		
MP29B	28	5236	5097	3,4%
MP29C		5150		
MP29A		4534		
MP29B	56	4807	4664	2,9%
MP29C		4652		

MP 29-10 MOE de flexión (t=20).

MUESTRA	EDAD [d]	MOEflex [MPa]		C.V.
MP29A		4641		
MP29B	28	5097	4942	5,3%
MP29C		5089		
MP29A		4482		
MP29B	56	4697	4627	2,7%
MP29C		4703		

A.30. Serie MP 30

Fecha de amasado: 31 de marzo de 2015

Fecha de rotura: 26 de mayo de 2015

Dimensiones 40x15x160 mm

Datos de ensayos.

MP 30-1 Espesores.

MUESTRA	ESPESOR [m]
MP30A	0,0152
MP30B	0,0140
MP30C	0,0152

MP 30-2 Carga máxima (flexión en tres puntos).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP30A		0,43
MP30B	56	0,45
MP30C		0,52

MP 30-3 Frecuencia de resonancia longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP30A		0,1467	6188
MP30B	28	0,1395	6124
MP30C		0,1512	6248
MP30A		0,1431	5936
MP30B	56	0,1355	5820
MP30C		0,1469	6132

MP 30-4 Frecuencia de resonancia transversal (t=40).

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP30A		0,1467	2436
MP30B	28	0,1395	2452
MP30C		0,1512	2512
MP30A		0,1431	2396
MP30B	56	0,1355	2348
MP30C		0,1469	2472

MP 30-5 Frecuencia de resonancia transversal (t=15).

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP30A		0,1467	1072
MP30B	28	0,1395	980
MP30C		0,1512	1092
MP30A		0,1431	1052
MP30B	56	0,1355	960
MP30C		0,1469	1088

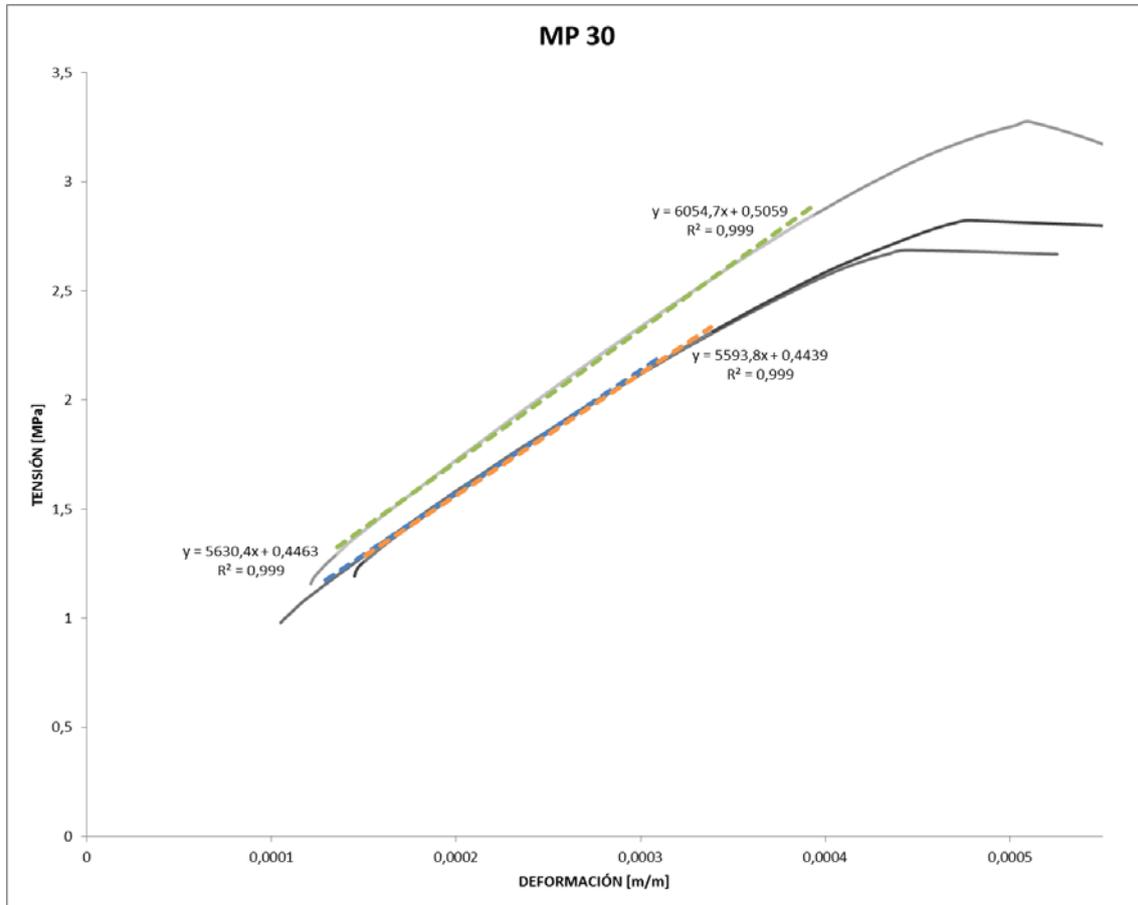
Valores de resistencia.

MP 30-6 Flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
MP30A		2,65	
MP30B	56	2,90	7,8%
MP30C		3,10	

Valores de Módulo de elasticidad.

MP 30-7 Curva tensión deformación y módulo elástico (flexotracción).



MUESTRA	EDAD [d]	E_m [MPa]	C.V.
MP30A		5630	
MP30B	56	5760	4,5%
MP30C		6055	

Datos y resultados.

MP 30-8 MOE longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MOElong [MPa]	C.V.
MP30A		5952	
MP30B	28	5854	5966 2,0%
MP30C		6093	
MP30A		5343	
MP30B	56	5135	5408 5,7%
MP30C		5747	

MP 30-9 MOE de flexión (t=40).

MUESTRA	EDAD [d]	MOEflex [MPa]	C.V.
MP30A		4912	
MP30B	28	4998	5040 3,1%
MP30C		5212	
MP30A		4636	
MP30B	56	4451	4674 5,2%
MP30C		4935	

MP 30-10 MOE de flexión (t=15).

MUESTRA	EDAD [d]	MOEflex [MPa]	C.V.
MP30A		5038	
MP30B	28	4686	4907 3,9%
MP30C		4997	
MP30A		4733	
MP30B	56	4368	4640 5,2%
MP30C		4819	

A.31. Serie MP 31

Fecha de amasado: 31 de marzo de 2014

Fecha de rotura: 28 de abril de 2015

Dimensiones 40x40x160 mm

Datos de ensayos.

MP 31-1 Deformación longitudinal de compresión.

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA 5%[kN]	CARGA 33%[kN]	ϵ 5%[$\mu\epsilon$]	ϵ 33%[$\mu\epsilon$]
MP31A				92	522
MP31B	28	0,60	4,00	137	587
MP31C				93	514

MP 31-2 Carga máxima (flexión en tres puntos).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP31A		0,96
MP31B	28	1,14
MP31C		0,93

MP 31-3 Carga máxima (compresión).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP31A		8,59
MP31B	28	8,04
MP31C		10,44
		10,72
		9,11
MP31C		9,27

MP 31-4 Frecuencia de resonancia longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP31A		0,4057	6344
MP31B	28	0,3980	6348
MP31C		0,4082	6400

MP 31-5 Frecuencia de resonancia transversal.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP31A		0,4057	2788
MP31B	28	0,3980	2804
MP31C		0,4082	2604
			2624
			2584
MP31C			2680

Valores de resistencia.

MP 31-6 Flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
MP31A		2,20	
MP31B	28	2,65	2,3 12,6%
MP31C		2,10	

MP 31-7 Compresión.

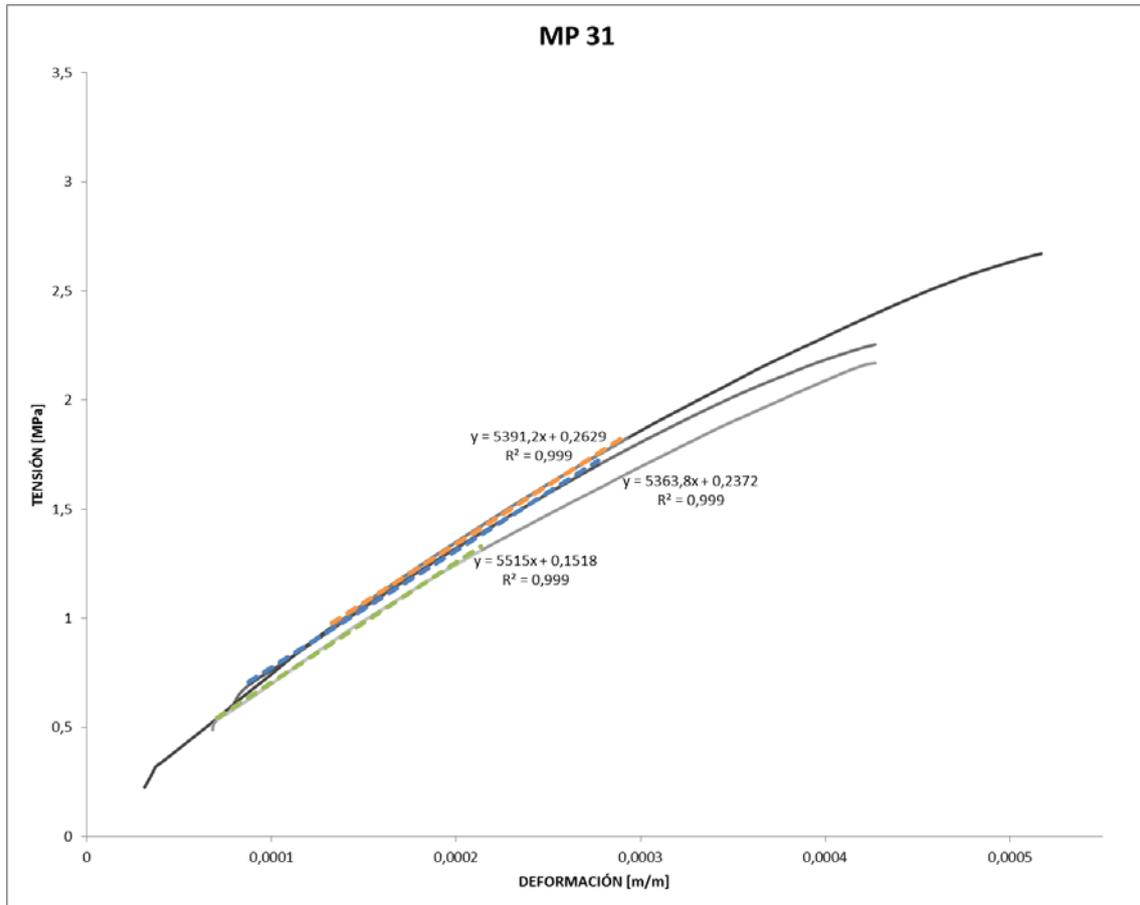
MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
MP31A			
MP31B	28	6,60	6,2 9,9%
		6,80	
MP31C		5,60	
		5,70	

Valores de Módulo de elasticidad.

MP 31-8 Módulo elástico bajo compresión.

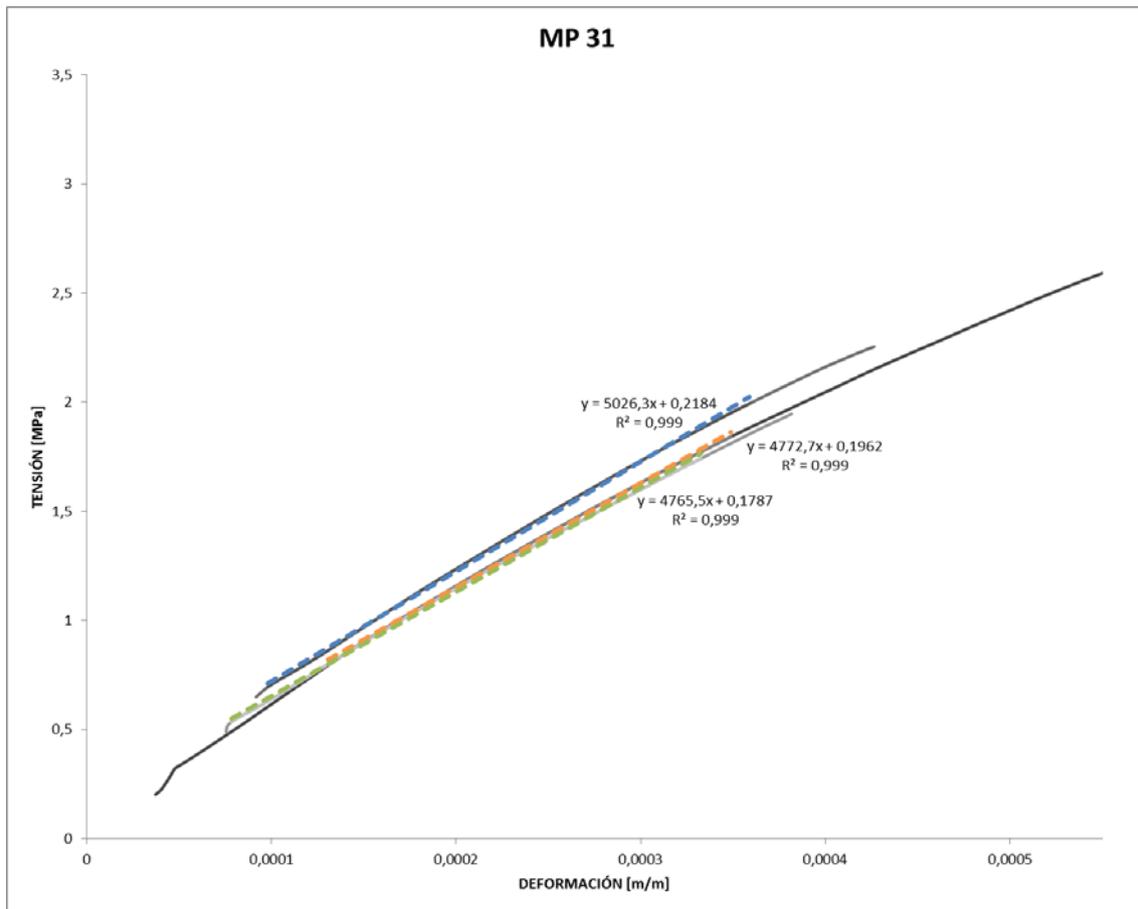
MUESTRA	EDAD [d]	Em [MPa]	C.V.
MP31A		4942	
MP31B	28	4722 4904	3,4%
MP31C		5048	

MP 31-9 Curva tensión deformación y módulo elástico (flexotracción).



MUESTRA	EDAD [d]	Em [MPa]	C.V.
MP31A		5364	
MP31B	28	5391 5423	1,5%
MP31C		5515	

MP 31-10 Curva tensión deformación y módulo elástico (compresión).



MUESTRA	EDAD [d]	E_m [MPa]	C.V.
MP31A		5026	
MP31B	28	4773 4855	3,1%
MP31C		4766	

MP 31-11 MOE longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MOElong [MPa]	C.V.
MP31A		6451	
MP31B	28	6497 6517	1,2%
MP31C		6605	

MP 31-12 MOE de flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	MOEflex [MPa]	C.V.
MP31A		6635	
MP31B	28	6592	
		5929	
		6143	6,2%
		5911	
MP31C		5734	
		6059	

A.32. Serie MP 32

Fecha de amasado: 31 de marzo de 2015

Fecha de rotura: 21 de julio de 2015

Dimensiones 40x40x160 mm

Datos de ensayos.

MP 32-1 Deformación longitudinal de compresión.

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA 5%[kN]	CARGA 33%[kN]	ϵ 5%[$\mu\epsilon$]	ϵ 33%[$\mu\epsilon$]
MP32A				95	501
MP32B	112	0,60	4,00	79	479
MP32C				87	510

MP 32-2 Carga máxima (flexión en tres puntos).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP32A		1,34
MP32B	112	1,22
MP32C		1,15

MP 32-3 Carga máxima (compresión).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
MP32A		11,77
MP32B	112	11,98
MP32C		11,74
		11,91
		11,37
MP32C		11,55

MP 32-4 Frecuencia de resonancia longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP32A		0,4014	6488
MP32B	28	0,4037	6428
MP32C		0,3943	6324
MP32A		0,3910	6316
MP32B	42	0,3905	6360
MP32C		0,3896	6208
MP32A		0,3890	6152
MP32B	112	0,3880	6084
MP32C		0,3890	6012

MP 32-5 Frecuencia de resonancia longitudinal¹.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP32A		0,3882	6288
MP32B	56	0,3869	6220
MP32C		0,3880	6152
MP32A		0,3890	6260
MP32B	112	0,3880	6200
MP32C		0,3890	6112

¹ Medición realizada con acelerómetro uniaxial.

MP 32-6 Frecuencia de resonancia de torsión¹.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP32A		0,3882	3704
MP32B	56	0,3869	3684
MP32C		0,3880	3636
MP32A		0,3890	3668
MP32B	112	0,3880	3668
MP32C		0,3890	3608

MP 32-7 Frecuencia de resonancia transversal.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP32A		0,4014	2664 2704
MP32B	28	0,4037	2652 2660
MP32C		0,3943	2600 2624
MP32A		0,3910	2472
MP32B	42	0,3905	2480
MP32C		0,3896	
MP32A		0,3890	2516 2580
MP32B	112	0,3880	2492 2564
MP32C		0,3890	2536

MP 32-9 Frecuencia de resonancia transversal¹.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
MP32A		0,3882	2760
MP32B	56	0,3869	2720
MP32C		0,3880	2656
MP32A		0,3890	2680
MP32B	112	0,3880	2708
MP32C		0,3890	2644

Valores de resistencia.

MP 32-8 Flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
MP32A		3,15	
MP32B	112	2,85	2,9 7,9%
MP32C		2,70	

MP 32-10 Compresión.

MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
MP32A		7,35 7,50	
MP32B	112	7,35 7,45	7,3 2,1%
MP32C		7,10 7,20	

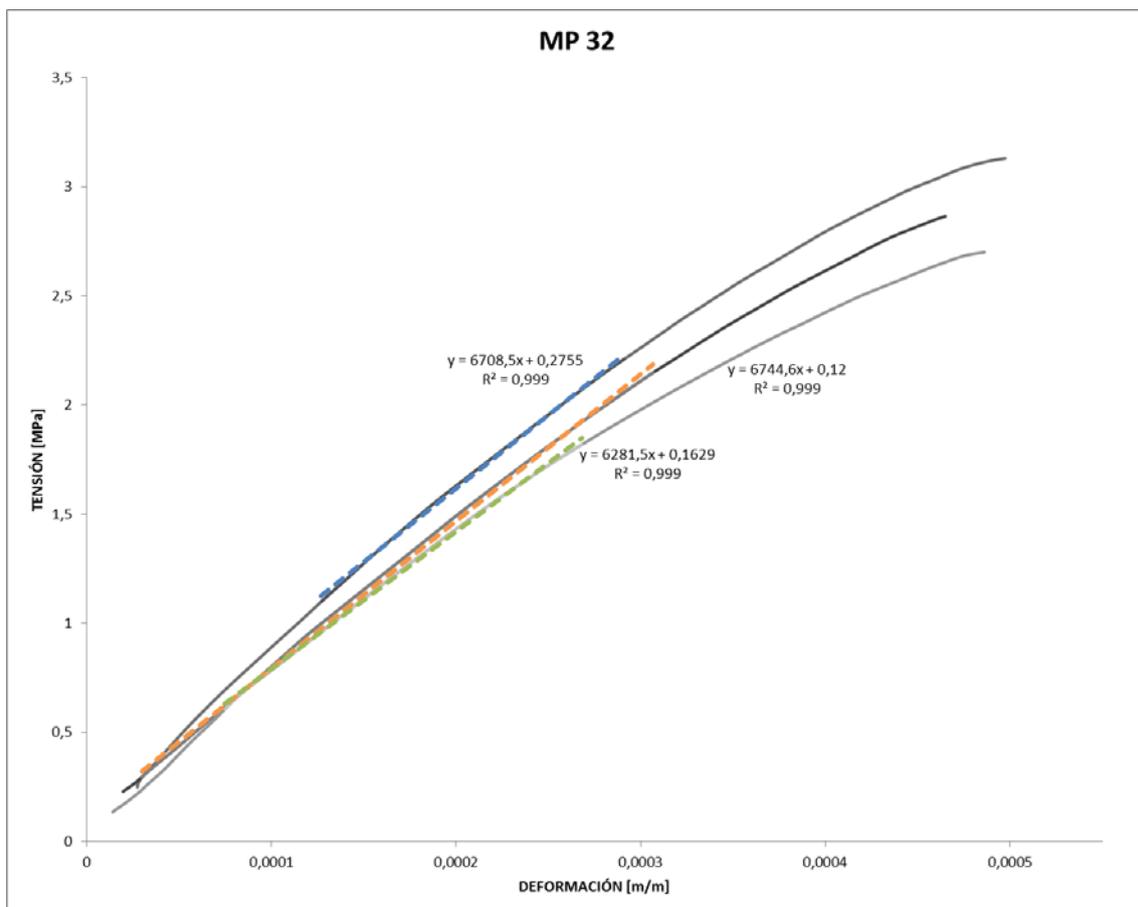
¹ Mediación realizada con acelerómetro uniaxial

Valores de Módulo de elasticidad.

MP 32-11 Módulo elástico bajo compresión.

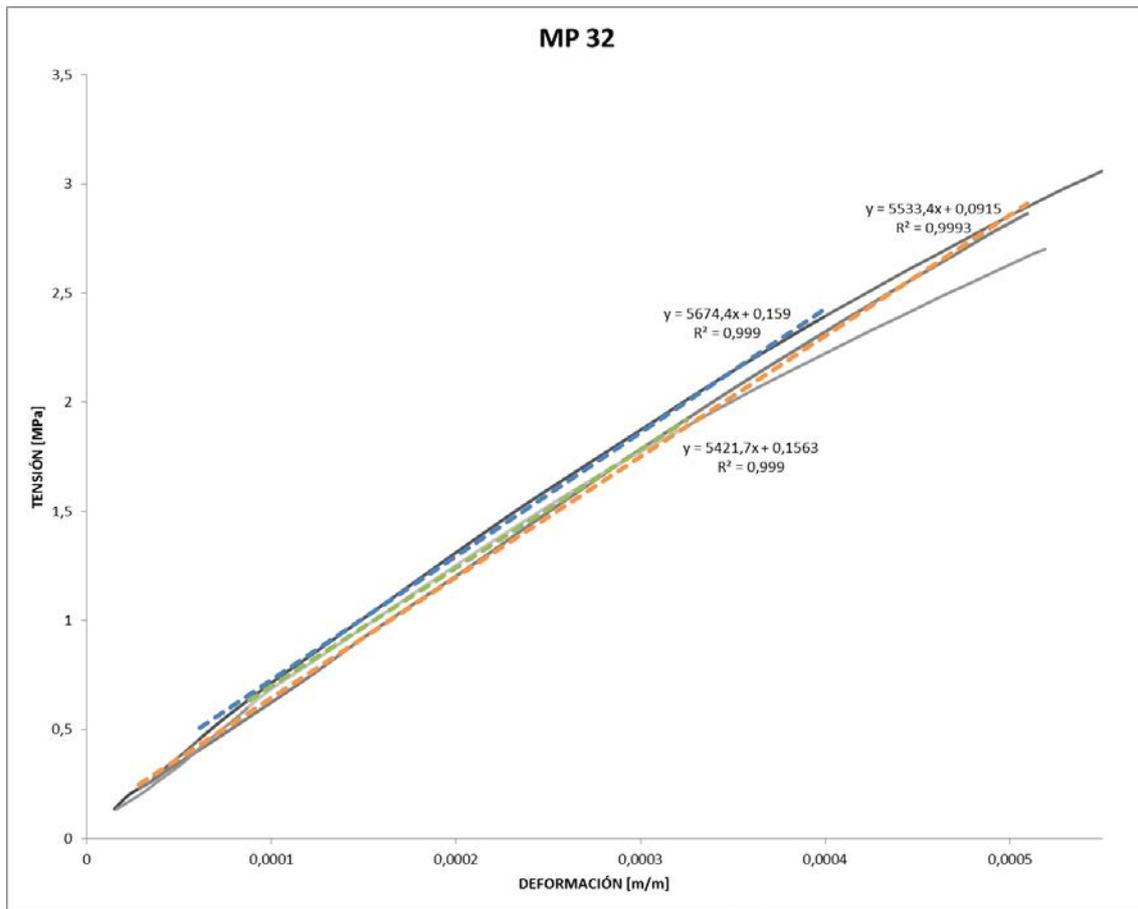
MUESTRA	EDAD [d]	E_m [MPa]	C.V.
MP32A		5234	
MP32B	112	5190	2,9%
MP32C		5024	

MP 32-12 Curva tensión deformación y módulo elástico (flexotracción).



MUESTRA	EDAD [d]	E_m [MPa]	C.V.
MP32A		6708	
MP32B	112	6578	3,9%
MP32C		6282	

MP 32-13 Curva tensión deformación y módulo elástico (compresión).



MUESTRA	EDAD [d]	E_m [MPa]	C.V.
MP32A		5674	
MP32B	112	5533 5543	2,3%
MP32C		5422	

MP 32-14 MOE longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MOElong [MPa]	C.V.
MP32A		6759	
MP32B	28	6672 6606	2,9%
MP32C		6388	
MP32A		6239	
MP32B	42	6318 6213	1,9%
MP32C		6082	
MP32A		5889	
MP32B	112	5745 5753	2,3%
MP32C		5624	

MP 32-15 MOE longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MOElong [MPa]	C.V.
MP32A		6140	
MP32B	56	5987 6025	1,7%
MP32C		5948	
MP32A		6098	
MP32B	112	5966 5983	1,8%
MP32C		5886	

Datos y resultados.

MP 32-16 MOE de flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	MOEflex [MPa]	C.V.
MP32A		6068	
		6252	
MP32B	28	6048	6028 2,5%
		6085	
		5856	
MP32C		5856	
MP32A		5090	
MP32B	42	5116	5396 9,4%
MP32C		5982	
		5246	
MP32A		5516	
		5133	
MP32B	112	5434	5234 5,8%
		4680	
MP32C		5397	

MP 32-17 MOE de flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	MOEflex [MPa]	C.V.
MP32A		6299	
MP32B	56	6098	6137 2,4%
MP32C		6013	
MP32A		5952	
MP32B	112	6061	5960 1,6%
MP32C		5866	

Valores de Módulo de deformación transversal.

MP 32-18 G dinámico.

MUESTRA	EDAD [d]	Gdinamico [MPa]	C.V.
MP32A		2520	
MP32B	56	2485	2488 1,3%
MP32C		2458	
MP32A		2477	
MP32B	112	2470	2458 1,1%
MP32C		2427	

Valores de coeficiente de Poisson.

MP 32-19 ν .

MUESTRA	EDAD [d]	ν	
MP32A		0,218	
MP32B	56	0,205	0,21 3,2%
MP32C		0,210	
MP32A		0,231	
MP32B	112	0,208	0,22 5,7%
MP32C		0,213	

A.33. Serie E

Fecha de amasado: 16 de octubre de 2012

Fecha de rotura: 14 de julio de 2015

Dimensiones 40x15x160 mm

Datos de ensayos.

E 33-1 Espesores.

MUESTRA	ANCHO [m]	ESPESOR [m]	LARGO [m]
E1	0,0396	0,0134	0,1620
E2	0,0410	0,0138	0,1610
E3	0,0395	0,0139	0,1490

E 33-5 Carga máxima (flexión en tres puntos).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
E1		0,41
E2	1000	0,39
E3		0,40

E 33-2 Frecuencia de resonancia longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
E1		0,1220	5860
E2	1000	0,1260	6064
E3		0,1200	6080

E 33-6 Frecuencia de resonancia longitudinal¹.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
E1	1000	0,1220	6144

E 33-3 Frecuencia de resonancia transversal (t=40).

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
E1		0,1220	2280
E2	1000	0,1260	2384
E3		0,1200	2568

E 33-7 Frecuencia de resonancia transversal (t=15).

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
E1		0,1220	884
E2	1000	0,1260	932
E3		0,1200	1060

E 33-4 Frecuencia de resonancia de torsión¹.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
E1	1000	0,1220	2244

¹ Medición realizada con acelerómetro uniaxial

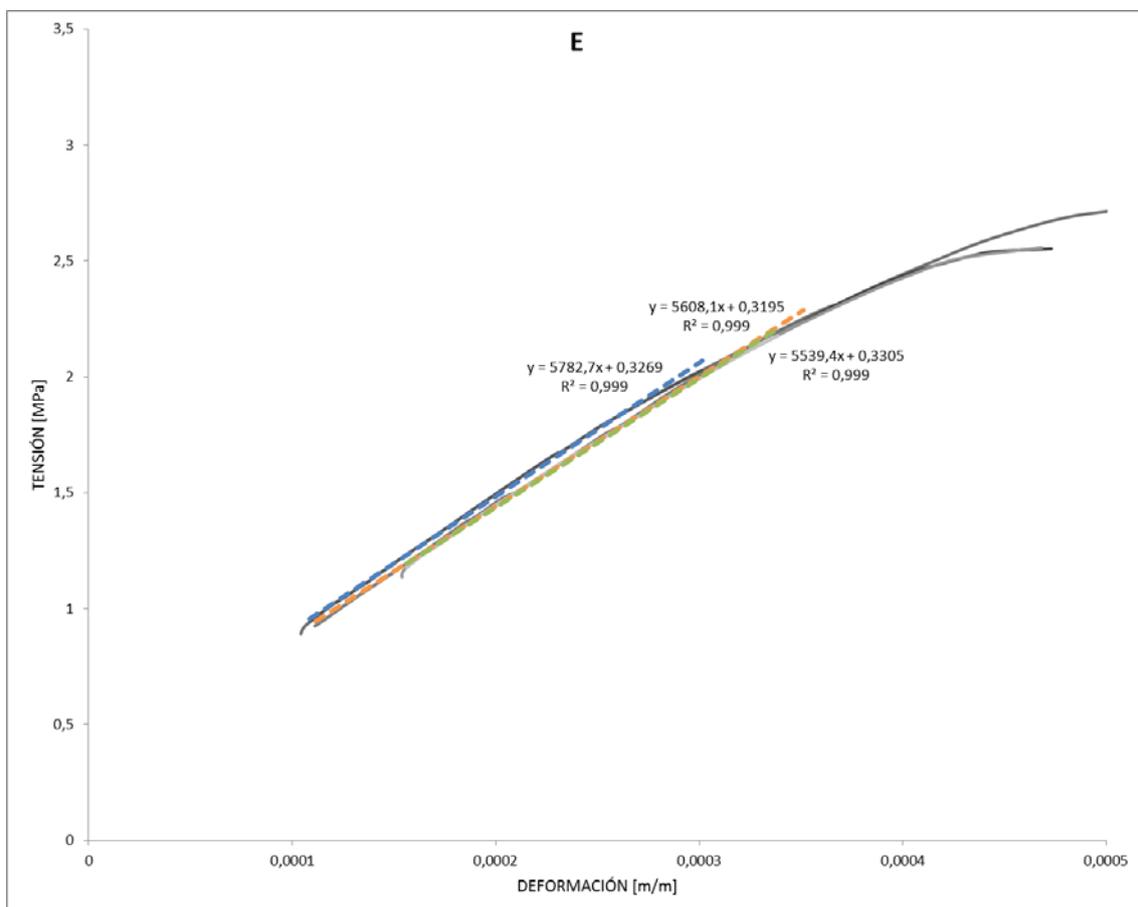
Valores de resistencia.

E 33-8 Flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
E1		2,55	
E2	1000	2,40 2,5	3,5%
E3		2,40	

Valores de módulo de elasticidad.

E 33-9 Curva tensión deformación y módulo elástico (flexotracción).



MUESTRA	EDAD [d]	E _m [MPa]	C.V.
E1		5783	
E2	1000	5608 5643	2,2%
E3		5539	

E 33-10 MOE longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MOElong [MPa]	C.V.
E1		5250	
E2	1000	5198	5041 6,3%
E3		4675	

E 33-12 MOE longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MOElong [MPa]
E1	1000	5771

E 33-11 MOE de flexión (t=40).

MUESTRA	EDAD [d]	MOEflex [MPa]	C.V.
E1		4493	
E2	1000	4166	4226 5,7%
E3		4019	

E 33-13 MOE de flexión (t=15).

MUESTRA	EDAD [d]	MOEflex [MPa]	C.V.
E1		4548	
E2	1000	4044	4218 6,8%
E3		4062	

Valores de Módulo de deformación transversal.

E 33-14 G dinámico.

MUESTRA	EDAD [d]	Gdinamico [MPa]
E1	1000	2408

Valores de coeficiente de Poisson.

MP 33-15 ν .

MUESTRA	EDAD [d]	ν
E1	1000	0,21

A.34. Serie F

Fecha de amasado: 16 de octubre de 2012

Fecha de rotura: 14 de julio de 2015

Dimensiones 40x15x160 mm

Datos de ensayos.

F 34-1 Espesores.

MUESTRA	ANCHO [m]	ESPESOR [m]	LARGO [m]
F1	0,0420	0,0165	0,1610
F2	0,0395	0,0168	0,1600
F3	0,0400	0,0170	0,1550

F 34-5 Carga máxima (flexión en tres puntos).

MUESTRA	EDAD [d]	CARGA [kN]
F1		0,47
F2	1000	0,44
F3		0,43

F 34-2 Frecuencia de resonancia longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
F1		0,1570	5704
F2	1000	0,1440	5752
F3		0,1440	5908

F 34-6 Frecuencia de resonancia longitudinal¹.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
F1	1000	0,1570	5932

F 34-3 Frecuencia de resonancia transversal (t=40).

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
F1		0,1570	2228
F2	1000	0,1440	2208
F3		0,1440	2384

F 34-7 Frecuencia de resonancia transversal (t=15).

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
F1		0,1570	1060
F2	1000	0,1440	1064
F3		0,1440	1164

F 34-4 Frecuencia de resonancia de torsión¹.

MUESTRA	EDAD [d]	MASA [kg]	FRECUENCIA [Hz]
F1	1000	0,1570	2416

¹ Medición realizada con acelerómetro uniaxial

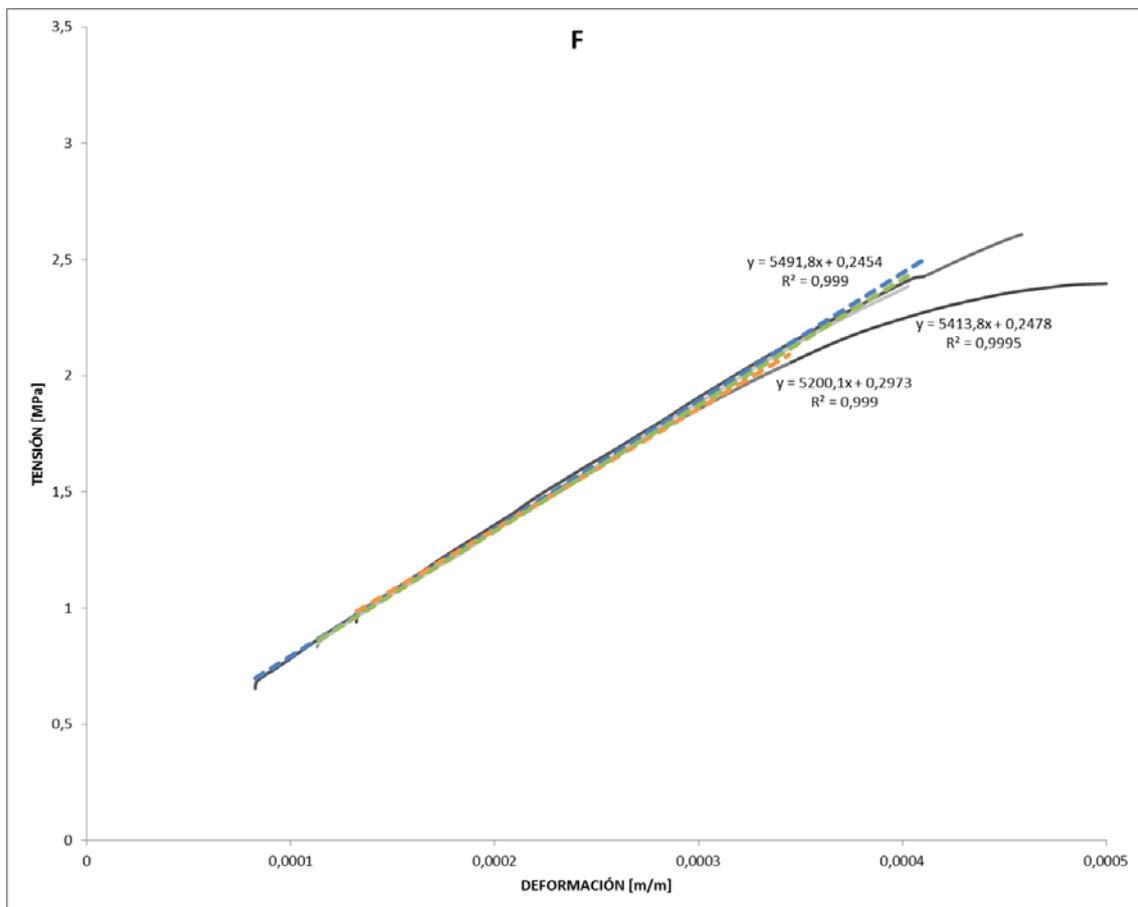
Valores de resistencia.

F 34-8 Flexión.

MUESTRA	EDAD [d]	f [MPa]	C.V.
F1		2,55	
F2	1000	2,20 2,3	8,1%
F3		2,25	

Valores de módulo de elasticidad.

F 34-9 Curva tensión deformación y módulo elástico (flexotracción).



MUESTRA	EDAD [d]	Em [MPa]	C.V.
F1		5492	
F2	1000	5200 5369	2,8%
F3		5414	

Datos y resultados.

F 34-10 MOE longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MOElong	[MPa]	C.V.
F1		4878		
F2	1000	4714	4736	2,8%
F3		4614		

F 34-12 MOE longitudinal.

MUESTRA	EDAD [d]	MOElong	[MPa]
F1	1000		5276

F 34-11 MOE de flexión (t=40).

MUESTRA	EDAD [d]	MOEflex	[MPa]	C.V.
F1		3810		
F2	1000	3810	3805	0,2%
F3		3796		

F 34-13 MOE de flexión (t=15).

MUESTRA	EDAD [d]	MOEflex	[MPa]	C.V.
F1		4188		
F2	1000	3852	3980	4,6%
F3		3899		

Valores de Módulo de deformación transversal.

F 34-14 G dinámico.

MUESTRA	EDAD [d]	Gdinamico	[MPa]
F1	1000		2174

Valores de coeficiente de Poisson.

MP 34-15 ν .

MUESTRA	EDAD [d]	ν
F1	1000	0,21