



UNIVERSIDAD DE BURGOS

Tesis doctoral

Estudio experimental sobre propiedades mecánicas y de durabilidad de hormigones estructurales autocompactantes con áridos reciclados y su aplicación a la prefabricación

AUTOR:

Francisco Fiol Oliván

DIRECTORES DE TESIS:

Dr. D. Juan Manuel Manso Villalaín

Dr. D. Carlos Thomas García

Burgos, Marzo de 2016



UNIVERSIDAD DE BURGOS

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS

E INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEL TERRENO

DOCTORADO INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

TESIS DOCTORAL

Estudio experimental sobre propiedades mecánicas y de durabilidad de hormigones estructurales autocompactantes con áridos reciclados y su aplicación a la prefabricación

AUTOR:

Francisco Fiol Olivan

DIRECTORES DE TESIS

Dr. D. JUAN MANUEL MANSO VILLALAIN

Dr. D. CARLOS THOMAS GARCIA



D. Juan Manuel Manso Villalaín, Profesor doctor del Departamento de Ingeniería Civil de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos y **D. Carlos Thomas**, Profesor y doctor del Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales de la Universidad de Cantabria,

I N F O R M A N:

Que la presente memoria titulada “**Estudio experimental sobre propiedades mecánicas y de durabilidad de hormigones estructurales autocompactantes con áridos reciclados y su aplicación a la prefabricación**” se ha realizado en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la Construcción y del Terreno de la Universidad de Burgos, bajo su Dirección, por el Graduado en Ingeniería de la edificación D. Francisco Fiol Oliván y autorizan su presentación para que sea calificada como TESIS DOCTORAL

Burgos a 7 de Marzo de 2016

Fdo: Juan Manuel Manso Villalaín

Fdo: Carlos Thomas García

A Lidia y
a nuestros hijos Paco, Lucia y Miguel

A mis padres Carmen y Francisco

AGRADECIMIENTOS

Llevar a cabo esta tesis Doctoral solo ha sido posible después de un largo periodo de trabajo en el que quiero expresar toda mi gratitud hacia aquellos que me han ayudado a que sea posible.

En primer lugar quisiera manifestar mi agradecimiento a Juan Manuel Manso, por la confianza depositada en mí, haber creído y animado en este proyecto, desde el principio, por sus buenos consejos, por el buen hacer, nivel de exigencia y dedicación, Gracias Manolo.

A Carlos Thomas, director también de esta tesis, que desde que nos conocimos, me has apoyado en todo momento, por tu dedicación, conocimiento y experiencia también han sido fundamentales en la consecución de esta tesis, Gracias Carlos.

A mi Padre por la ayuda en todo momento y por haber transmitido su experiencia de tantos años en la ingeniería y la empresa.

También agradecer a la empresa Artepref Perteneiente al Grupo Gerardo de la Calle, a Ana de la calle y Gerard de la Calle, pues sin vuestro apoyo no hubiera sido posible haber llevado a buen término esta Tesis.

No puedo olvidar a mi compañero y amigo Carmelo Muñoz, pues han sido muchos los años de trabajo en común en la docencia, ahora en la investigación y sobre todo por todos los buenos momentos.

Una mención a mis compañeros de Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la Construcción y del Terreno, que me han trasmitido ánimo y ayuda en todo momento, Isabel Santamaría, Verónica Calderón, Chucho Gadea, José Antonio de la Fuente, Javier Garabito, Alberto González. También destacar y agradecer a Ángel Rodríguez, que siempre ha estado pendiente, ayudando y motivando este espíritu investigador que como director del Departamento nos ha inculcado.

Tampoco puedo olvidar a mis compañeros del Taller de construcciones y Laboratorio de Materiales, Josemi Solaguren y Jorge Hernández por vuestra ayuda incondicional, Pablo y Jose Luis. También a los compañeros del laboratorio de ingeniería Civil, Antonio y Roberto.

Por último deseo expresar mi agradecimiento a las empresas que han contribuido generosamente suministrando materias primas empleadas en esta tesis: Ladicim que ha colaborado en algunos ensayos, Cementos Alfa y Sika, por su aportación desinteresada en sus productos.

RESUMEN

La industria de la construcción y todas aquellas relacionadas con los derivados del cemento consumen una gran cantidad de recursos naturales. La extracción de áridos naturales empleados para la fabricación de morteros y hormigones se encuentra sometida a una problemática creciente debido al agotamiento de las canteras y las exigencias normativas, cada vez mayores, como el impacto ambiental producido.

Las industrias derivadas del cemento, todas aquellas relacionadas con la prefabricación de elementos estructurales para su aplicación en edificación y obra civil aportan tecnología fundamental para el desarrollo industrial de un país, siendo indispensables en el proceso constructivo.

En España existen numerosas empresas de prefabricados de hormigón estructural y no estructural. Estas empresas generan residuos resultantes de sus procesos productivos como elementos de hormigón. El aprovechamiento de estos residuos para incorporarlos de nuevo a la cadena productiva supone un ahorro económico además de contribuir a la sostenibilidad. Si además se aplican las últimas tecnologías, la referente a los hormigones autocompactantes, el resultado puede ser doblemente beneficioso.

La investigación que recoge la presente tesis doctoral se desarrolla a partir de un caso real, el de una empresa de prefabricados de hormigón estructural a nivel nacional, en la cual se ha estudiado la incorporación de los residuos de hormigón prefabricado a la forma del árido grueso en hormigones autocompactantes para generar nuevos elementos prefabricados.

El estudio experimental comprende varios estados; la trituración de los elementos prefabricados rechazados, caracterización del árido reciclado generado a partir de los primeros y diseño de las dosificaciones del nuevo hormigón autocompactante reciclado. El estudio experimental evalúa hormigones con sustituciones del 20%, 50% y 100% en peso de árido reciclado y experimenta con sus prestaciones mecánicas y durabilidad.

Con el fin de validar el estudio experimental llevado a cabo en el laboratorio, se utilizan las dosificaciones de hormigón reciclado a nivel industrial en la propia factoría productora de los residuos, con el ambiente y medios habituales de fabricación. También se realiza un estudio de elementos armados, comprobando su comportamiento estructural, a flexión, flexocompresión, cortante y deformación.

Por último, se realiza un estudio económico de los hormigones elaborados con áridos reciclados, planteando para ello varias opciones de obtención del árido resultante en la propia factoría, o con la intervención de una central de tratamiento de residuos cercana.

Palabras clave:

Residuo, Árido reciclado, hormigón reciclado, hormigón autocompactante, propiedades mecánicas, durabilidad, prueba industrial.

ABSTRACT:

The construction industry and all those related to cement consume a lot of natural resources. The extraction of natural aggregates used to manufacture mortars and concretes is an increasing problem, due to the exhaustion of the quarries and the increasing regulatory requirements, such as environmental impact.

Cement related industries, all those related to prefabricated structural elements for use in building and civil engineering, provide industrial and technological development of a country, being indispensable in the construction process.

In Spain there are a lot of companies of precast structural and non-structural concrete. These companies generate waste as a result of the manufacturing process. The use of these wastes for incorporation back to the supply chain saves money and contribute to the sustainability. If you also apply the latest modern technology, the self-compacting concrete, the result can be unbeatable.

The research develops an experimental study of a real case of a company of structural precast concrete, in which we studied the incorporation of waste as recycled aggregate, self-compacting concrete in order to manufacture new precast elements. The experimental study involves several states crushing precast rejected components recycled aggregate characterization and mix design of the new self-compacting concrete.

The experimental study evaluates the mechanical properties and durability of the concrete with percentages of incorporation as 20%, 50% and 100% of recycled aggregate.

To validate the experimental laboratory study also on industrial testing in the factory itself with the environment and manufacturing usual methods and with the dosages employed is carried out. A study of several assembled parts is also performed, checking structural behavior, flexural, splitting, cutting and deformation.

Finally, an economic study of concrete made with recycled aggregates is performed, raising it several options for obtaining the resulting aggregate in the factory itself, or with the intervention of a nearby treatment plant.

Keywords:

Waste, Recycled aggregate, recycled concrete, self-compacting concrete, mechanical properties, durability, industrial test.

INDICE GENERAL DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN, MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS	3
1.1. INTRODUCCIÓN	3
1.2. MOTIVACIÓN	4
1.3. OBJETIVOS.....	6
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	11
2.1. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE ARIDOS RECICLADOS.....	11
2.2. RELACIÓN DE PLANTAS DE ÁRIDOS RECILADOS EN CASTILLA Y LEÓN	23
2.3. PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS.....	30
2.4. EL HORMIGÓN RECICLADO.....	41
2.5. HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE.....	80
CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	87
3.1. OBJETIVOS.....	87
3.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES EMPLEADOS.....	91
3.3. DISEÑO DE LAS DOSIFICACIONES CON ÁRIDO RECICLADO	139
3.4. CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN RECICLADO	150
3.5. PLANIFICACIÓN DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....	194
3.6. CONCLUSIONES	198
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	201
4.1. INTRODUCCIÓN	201
4.2. ENSAYOS REALIZADOS AL HORMIGÓN	201
4.3. CONCLUSIONES	292
CAPÍTULO 5. PRUEBA INDUSTRIAL	297
5.1. INTRODUCCIÓN	297
5.2. MODELO EXPERIMENTAL INDUSTRIAL	297

5.3. RESULTADOS ENSAYOS REALIZADOS EN EL HORMIGÓN EN MASA	312
5.4. RESULTADOS ELEMENTOS ARMADOS	317
5.5. ESTUDIO ECONÓMICO	332
5.6. CONCLUSIONES CAPITULO 5	338
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN..	341
6.1. CONCLUSIONES FINALES	341
6.2. NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACION	342
CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA.....	345

INDICE DETALLADO DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN, MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS	3
1.1. INTRODUCCIÓN	3
1.1.1. Presentación del documento.....	3
1.2. MOTIVACIÓN	4
1.3. OBJETIVOS.....	6
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	11
2.1. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE ARIDOS RECICLADOS.....	11
2.1.1. Introducción	11
2.1.2. Situación del reciclaje en España. Análisis de la Normativa.....	11
2.1.3. Aplicación de áridos reciclados en prefabricación	14
2.1.4. Orígenes de los residuos de construcción y demolición	15
2.1.5. Residuos en la fase de demolición. Demolición selectiva.....	15
2.1.6. Proceso general de producción de áridos reciclados gruesos procedentes de RCD	16
2.1.6.1. Procedencia del AR	17
2.1.7. Clasificación de los áridos.....	18
2.1.7.1. Clasificación general según su origen	18
2.1.8. Clasificación según las diferentes normativas.....	18
2.1.9. Áridos reciclados procedentes de la industria de la prefabricación.....	22
2.2. RELACIÓN DE PLANTAS DE ÁRIDOS RECILADOS EN CASTILLA Y LEÓN	23
2.2.1. Producción de las plantas de reciclaje de Castilla y León	23
2.2.3. Plantas de tratamiento de RCD en la provincia de Burgos	24
2.2.3.1. Planta Resbur	25
2.2.3.2. Planta de residuos IGLECAR	25
2.2.3.3. Planta de residuos y excavaciones PÉREZ PÉREZ SL	26

2.2.3.4.	Planta de tratamiento de residuos en Miranda de Ebro. Residuos y Reciclajes Miranda SL.	27
2.2.3.5.	Planta de residuos grupo Gerardo de la Calle en Aranda de Duero	28
2.2.3.6.	Otras plantas.....	29
2.3.	PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS.....	30
2.3.1.	El árido reciclado	30
2.3.2.	Propiedades geométricas de los áridos reciclados	30
2.3.3.	Porcentaje de finos y de partículas de tamaño inferiores a 4 mm.	31
2.3.3.1.	Mortero adherido.....	32
2.3.3.2.	Forma y textura del árido reciclado.....	33
2.3.4.	Propiedades físicas y mecánicas del árido reciclado	34
2.3.5.	Requisitos químicos.....	38
2.3.5.1.	El contenido de sulfatos.....	38
2.3.5.2.	El contenido de cloruros	39
2.3.5.3.	Reacción álcali-árido.....	39
2.3.5.4.	Contaminantes e impurezas.	40
2.4.	EL HORMIGÓN RECICLADO	41
2.4.1.	Propiedades del hormigón reciclado en estado fresco	41
2.4.2.	Propiedades físico-mecánicas del hormigón reciclado.....	41
2.4.2.1.	Resistencia a compresión.....	47
2.4.2.2.	Resistencia a tracción.....	50
2.4.2.4.	Módulo de elasticidad	52
2.4.2.5.	Microestructura del hormigón con áridos reciclados.....	53
2.4.3.	Durabilidad del hormigón reciclado.....	55
2.4.3.1.	Clases de exposición	62
2.4.3.2.	Red capilar. Estructura de los poros.....	62
2.4.3.3.	Porosidad.....	64

2.4.3.4.	Absorción	66
2.4.3.5.	Succión capilar.....	67
2.4.3.6.	Penetración de agua bajo presión	68
2.4.3.7.	Fisuración	68
2.4.3.8.	Acciones mecánicas	69
2.4.3.9.	Retracción.....	69
2.4.3.10.	Retracción en hormigones con árido reciclado.....	73
2.4.3.11.	Resistencia a la helada	74
2.4.3.12.	Erosión.....	75
2.4.3.13.	Carbonatación.....	76
2.4.3.14.	Ataque por sulfatos	78
2.4.3.15.	El ataque por ácidos	79
2.4.3.16.	El ataque por álcalis.....	79
2.4.3.17.	Ataque por cloruros.....	80
2.5.	HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE.....	80
2.5.1.	Propiedades hormigón autocompactante	81
2.5.2.	Resumen de los estudios realizados en hormigones autocompactantes.....	82
CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL		87
3.1.	OBJETIVOS.....	87
3.1.1.	Elementos prefabricados estructurales	88
3.1.2.	Metodología de las actuaciones.....	90
3.2.	CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES EMPLEADOS.....	91
3.2.1.	Procedencia y obtención del árido reciclado.....	91
3.2.2.	Caracterización del árido reciclado	95
3.2.2.1.	Granulometría de los áridos.....	96
3.2.2.2.	Determinación del porcentaje de finos.....	97

3.2.2.3.	Coeficiente de forma	97
3.2.2.4.	Determinación del índice de lajas	99
3.2.2.5.	Densidad y absorción	101
3.2.2.6.	Coeficiente de Los Ángeles	102
3.2.2.7.	Determinación índice de machacabilidad	104
3.2.2.8.	Clasificación de los componentes del árido grueso reciclado ...	108
3.2.2.9.	Terrones de arcilla	110
3.2.2.10.	Contenido de materia orgánica.....	111
3.2.2.11.	Resistencia a la helada	111
3.2.2.12.	Contenido de mortero adherido	113
3.2.2.13.	Contenido de sulfatos solubles en ácido	116
3.2.2.14.	Determinación de sulfatos solubles en agua.	119
3.2.2.15.	Contenido de cloruros solubles en agua: Método Volhard	121
3.2.2.16.	Determinación de las pérdidas por calcinación	124
3.2.2.17.	Determinación de contaminantes ligeros.....	125
3.2.2.18.	Solubilidad al agua.....	127
3.2.2.19.	Composición química del árido reciclado	129
3.2.2.20.	Reactividad álcali-árido	130
3.2.3.	Comparativo de los resultados obtenidos con otras experiencias	134
3.2.4.	Estudio y procedencia del resto de materias primas	136
3.2.4.1.	Cemento	136
3.2.4.2.	Áridos naturales	136
3.2.4.3.	Aditivos	138
3.2.4.4.	Filler calizo	138
3.3.	DISEÑO DE LAS DOSIFICACIONES CON ÁRIDO RECICLADO	139
3.3.1.	Diseño de las dosificaciones.....	139
3.3.2.	Obtención de la dosificación definitiva	140

3.3.3. Programación y determinación de las condiciones de amasado en laboratorio.....	143
3.3.4. Relación agua/cemento efectiva	145
3.3.5. Ejecución del amasado	147
3.3.5.1. Equipos disponibles y preparación de materiales.....	147
3.3.5.2. Proceso de amasado en laboratorio	148
3.3.5.3. Curado del probetas	149
3.4. CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN RECICLADO	150
3.4.1. Control de consistencia	150
3.4.2. Propiedades mecánicas del hormigón endurecido.....	151
3.4.2.1. Resistencia a compresión.....	151
3.4.2.2. Resistencia a tracción indirecta	151
3.4.2.3. Resistencia a flexión	152
3.4.2.4. Módulo de elasticidad estático.....	153
3.4.2.5. Módulo de elasticidad dinámico.....	156
3.4.3. Propiedades físicas y mecanismos de transporte. Aspectos influyentes en la durabilidad	157
3.4.3.1. Porosidad y absorción	157
3.4.3.2. Succión capilar.....	158
3.4.3.3. Penetración de agua bajo presión	161
3.4.3.4. Densidad.....	161
3.4.3.5. Velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos	161
3.4.3.6. Evaluación microestructural.....	162
3.4.3.7. Macroporosidad mediante Tomografía Axial Computarizada....	163
3.4.3.8. Porosidad por intrusión de mercurio	166
3.4.4. Procesos físicos que afectan a la durabilidad del hormigón ...	168
3.4.4.1. <i>Fisuración por retracción</i>	168
3.4.4.2. Ciclos de hielo-deshielo	174

3.4.4.3.	Desgaste por abrasión	178
3.4.4.4.	Envejecimiento por choque térmico	179
3.4.5.	Procesos químicos de alteración de la durabilidad del hormigón	181
3.4.5.1.	Carbonatación natural.....	181
3.4.5.2.	Carbonatación acelerada.....	181
3.4.5.3.	Ataque por ácidos. Ensayo de Kesternich	187
3.4.5.4.	Envejecimiento por inmersión en agua, sulfatos y agua de mar	189
3.4.5.5.	Ciclos de humedad-sequedad con agua potable.....	190
3.4.5.6.	Ciclos de humedad-sequedad por ataque de agua de mar.....	191
3.4.5.7.	Ciclos de humedad-sequedad con sulfatos	192
3.5.	PLANIFICACIÓN DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....	194
3.5.1.	Ensayos sobre el hormigón.....	194
3.5.1.1.	Propiedades mecánicas.....	194
3.5.1.2.	Propiedades físicas y mecanismo de transporte con influencia en la durabilidad	194
3.5.1.3.	Propiedades de durabilidad	195
3.5.1.4.	Resistencia a los agentes químicos.....	196
3.5.1.5.	Prueba industrial	196
3.6.	CONCLUSIONES	198
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....		201
4.1.	INTRODUCCIÓN	201
4.2.	ENSAYOS REALIZADOS AL HORMIGÓN	201
4.2.1.	Consistencia del hormigón en estado fresco	201
4.2.2.	Propiedades mecánicas del hormigón	202
4.2.2.1.	Resistencia a compresión.....	202
4.2.2.2.	Resistencia a tracción indirecta	205
4.2.2.3.	Resistencia a flexotracción	208

4.2.2.4.	Módulo de elasticidad estático	211
4.2.2.5.	Módulo de elasticidad dinámico	215
4.2.3.	Propiedades físicas y mecanismos de transporte. Aspectos influyentes en la durabilidad	217
4.2.3.1.	Coeficiente de absorción	217
4.2.3.2.	Porosidad accesible	221
4.2.3.3.	Succión por capilaridad.....	224
4.2.3.4.	Penetración de agua bajo presión	228
4.2.3.5.	Densidad	232
4.2.3.6.	Velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos	235
4.2.3.7.	Caracterización por microscopía electrónica de barrido.....	236
4.2.3.8.	Composición mineralógica del hormigón	240
4.2.3.9.	Macroporosidad mediante Tomografía Axial Computarizada	241
4.2.3.10.	Porosidad por intrusión de mercurio	246
4.2.4.	Procesos físicos que afectan a la durabilidad del hormigón ...	248
4.2.4.1.	Fisuración por retracción	248
4.2.4.2.	Envejecimiento por ciclos de hielo-deshielo	262
4.2.4.3.	Ensayo de abrasión	266
4.2.4.4.	Envejecimiento acelerado por choque térmico	268
4.2.5.	Procesos químicos que afectan a la durabilidad del hormigón.....	270
4.2.5.1.	Carbonatación natural.....	270
4.2.5.2.	Carbonatación acelerada	271
4.2.5.3.	Ataque por ácidos. Ensayos de Kesterlinch	278
4.2.5.4.	Envejecimiento por inmersión en agua, sulfatos y agua de mar	280
4.3.	CONCLUSIONES	292
4.3.1.	Conclusiones relativas a las propiedades mecánicas del hormigón	292
4.3.2.	Conclusiones relativas a la durabilidad	292

CAPÍTULO 5. PRUEBA INDUSTRIAL	297
5.1. INTRODUCCIÓN	297
5.2. MODELO EXPERIMENTAL INDUSTRIAL	297
5.2.1. Definición de los elementos prefabricados vigas	298
5.2.2. Materiales y dosificación empleada.....	300
5.2.3. Proceso de amasado y ejecución	301
5.2.4. Ensayos realizados.....	304
5.2.4.1. Materiales componentes	304
5.2.4.2. Elementos estructurales	304
5.3. RESULTADOS ENSAYOS REALIZADOS EN EL HORMIGÓN EN MASA	312
5.3.1. Resistencia a compresión.....	312
5.3.2. Tracción indirecta.....	314
5.3.3. Ensayo de absorción y porosidad	314
5.3.4. Penetración de agua bajo presión	315
5.3.5. Fisuración por retracción.....	315
5.4. RESULTADOS ELEMENTOS ARMADOS	317
5.4.1. Rotura a flexión.....	317
5.4.2. Rotura por flexión-cortante.....	322
5.4.3. Rotura por esfuerzo cortante.....	326
5.4.4. Deformación diferida.....	330
5.5. ESTUDIO ECONÓMICO.....	332
5.5.1. Valoración cuantitativa.....	333
5.5.1.1. Precios simples unitarios	333
5.5.1.2. Precios descompuestos de los hormigones utilizados	336
5.5.2. Valoración cualitativa	337
5.6. CONCLUSIONES CAPITULO 5.....	338
5.6.1. Conclusiones relativas a la prueba industrial.....	338

5.6.2. Conclusiones relativas al estudio económico	338
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN..	341
6.1. CONCLUSIONES FINALES.....	341
6.2. NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACION.....	342
CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA.....	345

INTRODUCCIÓN, MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN, MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

1.1. INTRODUCCIÓN

1.1.1. Presentación del documento

El documento está dividido en cinco partes cuyo contenido se describe de manera escueta a continuación.

Capítulo 1 Introducción, motivación y objetivos

En este primer capítulo se estructura y justifica el documento, desde su motivación, exponiendo sintéticamente el objetivo fundamental.

Capítulo 2 Estado del arte

En este capítulo se expone una revisión del estado del arte revisando los antecedentes y el estado actual del conocimiento sobre los residuos de construcción y demolición. También se analizan los estudios referentes a las propiedades del árido reciclado y el hormigón reciclado, atendiendo a sus propiedades mecánicas, físicas, durabilidad y pruebas industriales relacionadas con el empleo en prefabricación.

Capítulo 3 Materiales y metodología

El objetivo del capítulo es doble pues primeramente se analiza la obtención de los áridos procedentes de los residuos, no conformidades y rechazos del proceso de fabricación de la empresa colaboradora, así como la organización y resto de materias primas. A partir del estudio anterior se procede al diseño de las dosificaciones que conformen los hormigones estructurales autocompactantes que se aplicará en la gama de elementos prefabricados de la empresa para planificar la campaña de ensayos y las técnicas experimentales empleadas basadas, la mayoría de ellas, en la Normativa vigente y en otras técnicas adaptadas a las necesidades particulares del presente estudio.

Capítulo 4 Resultados y análisis

En este capítulo se exponen y analizan los resultados, sintetizando las variables intervinientes y justificando la veracidad de las mismas.

Capítulo 5 Prueba industrial

El objetivo fundamental de este capítulo es la comprobación a escala industrial de la bondad de los hormigones ensayados en laboratorio con el fin de aplicarlos en elementos prefabricados a pequeña escala que justifique su funcionamiento estructural. El estudio económico nos determinará los parámetros de costes como aplicación del estudio realizado.

Capítulo 6 Conclusiones y futuras líneas de investigación

En la última parte del documento se resumen las conclusiones más determinantes del citado estudio así como las posibles líneas de investigación futuras derivadas del mismo.

Bibliografía

Las referencias bibliográficas se exponen por orden alfabético, si bien se especifican a pie de página a lo largo del documento, para su mejor seguimiento.

1.2. MOTIVACIÓN

Si bien la construcción por montaje es tan antigua como la civilización misma (sirvan como ejemplo los templos griegos y romanos), la llamada construcción por mecano o prefabricada se ha ido consolidando a lo largo del tiempo.

Los orígenes de las estructuras de hormigón prefabricado datan de 1820. En Francia, Louis Joseph Vicat ya había fabricado piezas prismáticas prefabricadas de hormigón, aunque fue en Chicago donde se fabricaron los primeros bloques, tratando de sustituir a la piedra natural a base de cementos de cal y áridos calizos que se empleaban en los muros de fábrica.

La incidencia del consumo de hormigón en elementos prefabricados ordenados de mayor a menor es en: obra civil (infraestructuras viarias y ferroviarias), naves industriales, urbanización y edificios públicos y privados.

A nivel internacional, países como EEUU, Canadá, Japón, China o Nueva Zelanda tiene una mayor incidencia debido al mayor arraigo de las soluciones con elementos prefabricados. En Europa, los países más avanzados, son los que apuestan por la industria de la prefabricación, cabe destacar Holanda y Alemania, donde la participación de las soluciones industrializadas en la construcción llegan a un 45% y 38% respectivamente.

En España¹, si bien el porcentaje es más bajo (22%), existen más de cien plantas fabricantes de prefabricados, con un porcentaje mayor de empresas pequeñas, locales y suministradoras de elementos prefabricados estructurales y no estructurales.

La prefabricación constituye la versión industrializada de la construcción y sus ventajas son muchas, algunas de ellas son: mayor fiabilidad (calidad), precisión dimensional, rapidez de ejecución, optimización de secciones, mayor seguridad laboral y mayor vida útil.

Debe destacarse por encima de todas las estrategias el plan “*Precast Sustainability Strategy and Charter*” de la Asociación Británica de Prefabricados de Hormigón². Este plan anima a dichas empresas a ir más allá de lo que exige la legislación vigente, de tal forma que lleven a cabo acciones voluntarias que permitan una mayor sostenibilidad en los productos y operaciones que realizan. En 2013, el Consejo Británico del Prefabricado aprobó una nueva batería de medidas a cumplir en el año 2020, tomando como base algunos datos de 2012. Algunas de ellas se especifican a continuación:

- *10% de reducción de la energía total utilizada en la fabricación;*
- *20% de reducción de las emisiones de CO₂;*
- *10% de reducción de los residuos en las fábricas;*
- *Reducción de 0,5 kg/tn los residuos de fábrica a enviar a vertedero;*
- *Incremento al 25% de la proporción de adiciones alternativas al cemento;*
- ***Incremento al 25% de la proporción de áridos reciclados o secundarios;***
- *20% de reducción del consumo total de agua;*

Otro asunto importante a tratar será el cumplimiento de las empresas de prefabricados con el nuevo requisito básico “Uso sostenible de los recursos naturales” que se incluyó en el Reglamento UE 305/2011 de Productos de Construcción³. Las obras de construcción deberán proyectarse, construirse y demolerse de tal forma que la utilización de los recursos naturales sea sostenible y garantice en particular:

¹ ANDECE Asociación de fabricantes de derivados del cemento.

² BPCA (2013). *Precast Sustainability Strategy and Charter*. British Precast Concrete Association.

³ UE (2011). “Reglamento (UE) No 305/2011 del Parlamento Europeo y del consejo por el que se establecen condiciones armonizadas para la comercialización de productos de construcción y se deroga la Directiva 89/106/CEE del Consejo.”

- *La reutilización y la reciclabilidad de las obras de construcción, sus materiales y sus partes tras la demolición;*
- *La durabilidad de las obras de construcción;*
- *La utilización de materias primas y materiales secundarios en las obras de construcción que sean compatibles desde el punto de vista medioambiental.*

Si además se tiene en cuenta que el árido conforma casi un 80% del volumen total del hormigón y que los áridos suponen la materia prima con más producción después del agua, además de que la extracción de áridos naturales se encuentra sometida a una problemática económica y ambiental creciente debido, tanto al progresivo agotamiento de los recursos naturales obtenidos en las canteras, como a la aplicación de normativas cada vez más exigentes por parte de las Administraciones Públicas. La recuperación de hormigones y su posterior tratamiento para incorporarlos de nuevo como sustituto del árido natural es un valor a tener en cuenta.

La experiencia de los miembros del equipo investigador durante varios años trabajando en empresas de prefabricados a nivel nacional, en diferentes departamentos de las mismas, así como la actividad docente e investigadora llevada a cabo a través de la Universidad, motiva la necesidad de estudiar e impulsar la construcción en su faceta de industrialización. Si además se incorporan los criterios de sostenibilidad actuales, se tiene una reflexión cuyo germen motiva la elaboración de la presente Tesis Doctoral.

1.3. OBJETIVOS

Los objetivos son varios y pretenden avanzar y facilitar vías de aplicación de los hormigones reciclados aplicados a la prefabricación, sector constructivo e industrial al que se deben dar argumentos de futuro.

El reciclaje de los RCD y en particular los derivados de los rechazos de fabricación de las industrias del prefabricado y su incorporación en hormigones con varios grados de sustitución de áridos reciclados como sustitutos de los áridos naturales, incide de manera positiva en el medio ambiente al reducir la continua explotación de canteras de árido natural que producen un importante impacto medioambiental y además repercute favorablemente en la economía.

Es evidente la influencia de las materias primas y, en mayor proporción la de los áridos naturales que conforman el origen de los hormigones prefabricados que van a ser reutilizados. En nuestro caso el árido natural procede de un ambiente geológico

sedimentario, de clasificación silícea rodada, con cierta carbonatación ya que presentan reacción con efervescencia al ácido clorhídrico.

El objetivo principal es por tanto elaborar un **hormigón estructural** de resistencia mínima a compresión de **30 y 45 MPa, autocompactante**, para la utilización en elementos prefabricados, con grados de sustitución de **20%, 50%, incluso de un 100%** de árido reciclado.

Existen pocos estudios relativos al aprovechamiento de residuos de empresas relacionadas con el sector del prefabricado y su incorporación de nuevo al proceso de fabricación.

La industria del prefabricado aporta las últimas tecnologías en hormigón autocompactante, máxima calidad en sus procesos, a través de sistemas integrales de calidad, y una gestión medioambiental ligada a toda empresa que quiera aportar criterios de sostenibilidad.

Los objetivos específicos de la Tesis son por tanto:

- *Establecer un proceso de obtención del árido reciclado proveniente de piezas rechazadas, sin salida o aprovechamiento en los parques de residuos que toda empresa de prefabricados posee anexo a sus instalaciones*
- *Caracterizar el árido reciclado así obtenido atendiendo a la normativa existente y teniendo en cuenta la naturaleza y procedencia silícea natural.*
- *Diseñar las dosificaciones adecuadas con resistencias mínimas a compresión de 30 MPa y 45 MPa que abarquen la mayor gama de productos prefabricados para grados de sustitución de 20%,50%,100% y su correspondiente hormigón de control o referencia.*
- *Comprobar la respuesta de los hormigones reciclados, en referencia a sus características mecánicas como tracción, flexotracción, módulo de elasticidad estático y dinámico, todo ello comparado con el hormigón de referencia.*
- *Examinar sus propiedades físicas referentes a los mecanismos de transporte como absorción, porosidad, penetración de agua bajo presión, comprobar sus mecanismos de fractura mediante microscopía electrónica y contrastar su macroporosidad y microporosidad.*
- *Para el diseño de un hormigón estructural es requisito también la comprobar su durabilidad ya que la aplicación de los elementos prefabricados pueden estar sometidos a diferentes ambientes. Así se examinara las*

acciones físicas como retracción, ciclos hielo-deshielo, ciclos de choque térmico y abrasión.

- *Comprobación de la durabilidad del hormigón así diseñado con respecto a la acción de sustancias químicas tales como atmosferas agresivas de SO_3 o ciclos de humedad-sequedad con agua potable, agua de mar y agua con sulfatos.*
- *Finalmente, la comprobación de los hormigones elaborados a escala industrial y la fabricación de varias piezas prefabricadas para comprobar su respuesta frente a esfuerzos reales.*

Es por tanto, el conjugar los tres parámetros antes descritos, tecnología del hormigón, calidad y criterios medioambientales, incorporando un nuevo material reciclado a los procesos de fabricación para la obtención de nuevos elementos prefabricados, con las garantías suficientes para su incorporación en el mercado, **un reto que se marcará como objetivo en el presente trabajo.**

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE ARIDOS RECICLADOS

2.1.1. Introducción

Se entiende por árido reciclado aquel que resulta de los tratamientos de residuos inorgánicos e inertes procedentes de la construcción y/o la demolición. Según el origen de los residuos pueden distinguirse áridos reciclados procedentes del hormigón, áridos reciclados procedentes de residuos cerámicos y áridos reciclados mixtos, siendo estos últimos los obtenidos a partir de mezclas de residuos de naturaleza cerámica y cementicia.

En este capítulo se recogen los resultados y conclusiones de los principales trabajos de investigación publicados en los últimos años sobre áridos reciclados procedentes de residuos de hormigón, así como los relacionados con las propiedades mecánicas de hormigones reciclados fabricados con dichos áridos y el comportamiento de estos hormigones en elementos de hormigón sometidos a esfuerzos de flexión con estados límites de fisuración y deformación.

2.1.2. Situación del reciclaje en España. Análisis de la Normativa

A continuación se describe la situación del reciclaje en España.

El primer PNRCD⁴ 2001-2006 fue aprobado por acuerdo del consejo de ministros de fecha 1 de junio de 2001. El PNR⁵ 2008-2015 en su artículo 12 "*Residuos de Construcción y Demolición (RCD)*"⁶ recoge el objetivo que los estados miembros adopten las medidas necesarias para garantizar que, antes del año 2020, el 70 % del peso de los residuos no peligrosos procedentes de la construcción y demolición sean destinados a operaciones de reutilización y reciclado. En el citado plan se incide de forma especial el fomentar la demanda de productos de reciclado de RCD⁷, en especial de áridos reciclados, proponiendo para el año 2015 llegar al 35% de reciclado de RCD⁷.

La regularización en España para este tipo de materiales da comienzo en noviembre de 2002 con la redacción del informe "*Hormigón reciclado*" del grupo de

⁴ PNRCD (2001). Plan Nacional de residuos de construcción y demolición. Ministerio de Medio Ambiente.

⁵ IIPNRCD (2007). II Plan Nacional de residuos de construcción y demolición. Ministerio de Medio Ambiente.

⁶ BOE-A-2009-3242 (2009). "Plan Nacional integrado de residuos para el Periodo 2008-2015".

⁷ RCD: Residuos de la construcción y demolición.

trabajo 2/5 de la Comisión Permanente del Hormigón en el que se hacía una revisión de la bibliografía y normativas de otros países, con el objetivo de promover un marco legal que amparase estos nuevos materiales. La posterior publicación de la Monografía ACHE-Hormigón Reciclado⁸ recoge alguna de las conclusiones derivadas.

Posteriormente los Ministerios de Medio Ambiente y Obras Públicas financian los proyectos RECNHOR⁹ y CLEAM¹⁰, ambos coordinados por CEDEX, así como otros proyectos de iniciativa privada como por ejemplo, en marzo de 2010, la Guía Española de Áridos reciclados procedentes de RCD (Proyecto GERD)¹¹ de la Asociación de Gestores de RCD. El objetivo principal del proyecto RECNHOR fue definir las recomendaciones para el uso de áridos reciclados en hormigón estructural en España incluidas éstas en la actual Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08¹², en su ANEJO 15, sobre la utilización de hormigones reciclados¹³. En la citada normativa también se valora la sensibilidad medioambiental de las centrales de fabricación del hormigón, así como los procedimientos de puesta en obra del mismo.

En la EHE-08, en su ANEJO 13, define un índice de contribución de la estructura a la sostenibilidad (**ICES**) obtenido a partir del índice de sensibilidad medioambiental de la misma (**ISMA**). Para el cálculo de este índice, uno de los requerimientos medioambientales que se definen es el empleo de áridos reciclados. En el ANEJO 18, titulado "*Hormigones de uso no estructural*", (existen estudios relativos para su aplicación¹⁴), se establece que se podrá utilizar hasta un 100% de árido grueso reciclado procedente de la trituración de residuos de hormigón, siempre que se cumplan las especificaciones definidas en el ANEJO 15 "*Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados*".

En cuanto a las propiedades no recogidas en ANEJO 15, se mantienen las mismas especificaciones que para el árido natural (coeficiente de Los Ángeles,

⁸ ACHE (2006). Comisión 2 Grupo de trabajo 2/5. Utilización del árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural. Madrid, ACHE: Asociación Científico Técnica del Hormigón Estructural. Utilización del árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural.

⁹ IECA (2011). Estudio prenormativo sobre la utilización de los RCD's en hormigón reciclado de aplicación estructural (Proyecto RECNHOR) y reciclado de los RCD's como áridos de hormigones estructurales (Proyecto CLEAM), IECA.

¹⁰ Alaejos, P., Sánchez, M., Martínez, F. and Gonzalez, B. (2011). Estudio Prenormativo sobre la utilización de los RCD's en hormigón reciclado de aplicación estructural (proyecto RECNHOR) y reciclado de los RCDs como áridos de hormigones estructurales (Proyecto CLEAM). IECA .

¹¹ GEAR (2010). "Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición." Asociación Española de Gestores de Residuos de la Construcción.

¹² EHE-08 (2008). Instrucción Española del Hormigón Estructural. Madrid, Ministerio de Fomento.

¹³ Martín-Morales, M., Zamorano, L. and Ruiz-Moyano, J. (2011). "Characterization of Recycled aggregates construction and demolition waste concrete production folloguin Spanish Structural Concrete Code EHE-08." Construction and Building Materials **25**: 742-748.

¹⁴ CEDEX (2009). Reciclados de RCD's como áridos de hormigones no estructurales, para el proyecto GENIT CLEAM., Ministerio de Fomento.

terrones de arcilla, contenido de cloruros y contenido de sulfatos). Estas limitaciones son en general más restrictivas que en otros países, debido a que las especificaciones de la EHE se establecen para los áridos reciclados procedentes de hormigón.

En la EHE-08 se propone una metodología para la producción y el uso del árido reciclado basándose en el documento RILEM TC 121¹⁵, indicando las propiedades que deben reunir los materiales reciclados para su uso en construcción.

El nivel de exigencia más restrictivo que se le impone al árido reciclado (AR) por parte de la EHE-08 se justifica debido a que el destino del mismo será hormigón estructural, limitándose la procedencia de estos áridos únicamente a escombros de hormigón, por ser estos los de mayor calidad.

Otro grupo de residuos de hormigón son los que proceden de plantas de prefabricados durante el proceso de calidad interna. Otros estudios especifican experiencias y aplicación con hormigones con áridos reciclados^{16 17}.

Los RCD que admite la instrucción, son aquellos que están compuestos por un 95% peso del hormigón y un 5% correspondiente a residuos inertes no peligrosos, como plásticos, maderas, etc. Siempre con un tamaño mayor de 4 mm.

A partir de datos recogidos en el proyecto GEAR¹⁸, en la Tabla 1 se muestra una clasificación según la naturaleza del árido.

Tabla 1 Tipos de áridos según Proyecto GEAR.

Tipo	Designación
ARC	Áridos Reciclados Cerámicos: > 95% cerámicos. (<1% de la producción)
ARA	Áridos Reciclados de Asfalto: > 95% asfalto. (<1% de la producción)
ARP	Áridos Reciclados de Piedra: > 95% piedra. (<10% de la producción)
ARM	Áridos Reciclados Mixtos: >95% H+C+A+P. (>85% de la producción)
ARH	Áridos reciclados del hormigón: P+H>90% (C>10%, A>5%, X>1%)
ARMH	Fracción de hormigón predominante, >30% <95% del peso
ARMC	Fracción de cerámicos predominante, >30% <95% del peso

¹⁵ TC-121, R. (2006). "RILEM International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures. Specifications for Concrete with Recycled Aggregates." Materials and Structures Details.

¹⁶ Alaejos, P., Domingo, A., Lázaro, C. and Sanchez, M. (2008). Puente reciclado sobre el río Turia en Manises (Valencia). III Congreso de Puentes y Estructuras de Edificación. Zaragoza. Asociación Científico-Técnica del hormigón.

¹⁷ Alaejos, M. P. and Calvo, B. (2010). "Construcción sostenible, primeras experiencias en España." Ministerio de Fomento Centro de Estudios y Experimentación obra pública.

¹⁸ GEAR (2010). "Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición." Asociación Española de Gestores de Residuos de la Construcción.

Tipo	Designación
ARMP	Fracción de piedra predominante, >30% <95% del peso

La recomendación de la RILEM tratan sobre la fracción de los áridos gruesos mayores de 4 mm para su uso en hormigón y cuya clasificación corresponde a áridos clasificados como *TIPO II*.

2.1.3. Aplicación de áridos reciclados en prefabricación

El ámbito de aplicación de los hormigones estructurales y no estructurales prefabricados, desde el punto de vista de su fabricación o ejecución, se esquematiza en la Fig. 1.

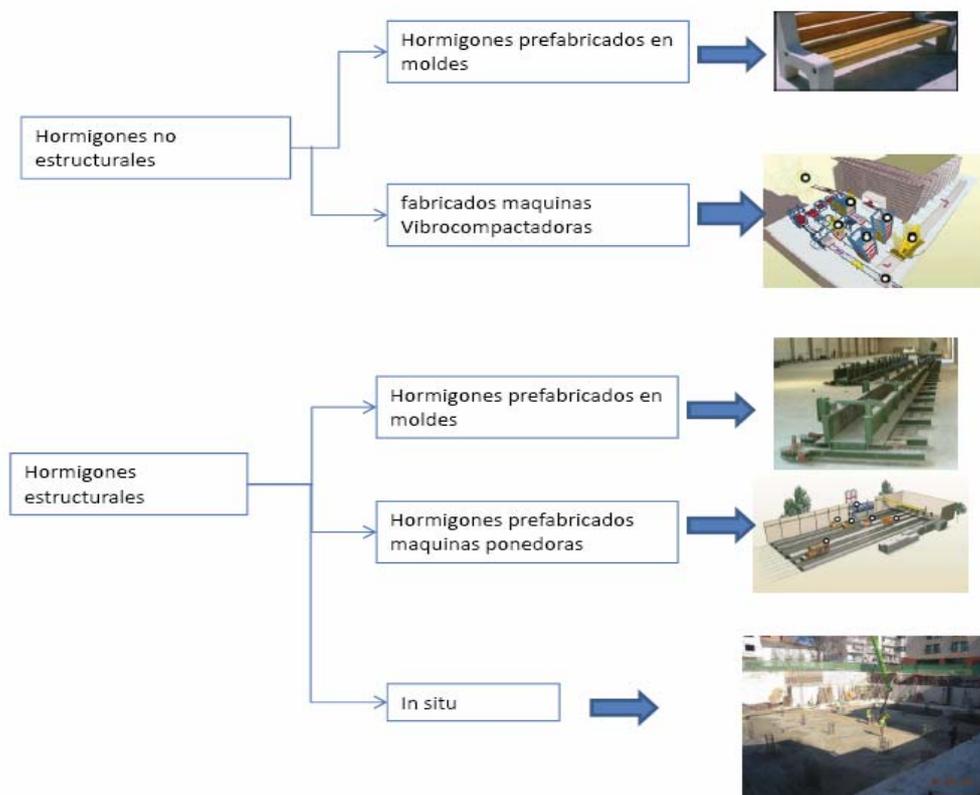


Fig. 1 Esquema de aplicaciones según su fabricación o ejecución.

Como se aprecia en la clasificación, la incorporación de áridos reciclados en prefabricación es viable desde el punto de vista de la fabricación para puesta en obra en moldes y/o en máquinas ponedoras, vibrocompactadoras, etc.

2.1.4. Orígenes de los residuos de construcción y demolición

El árido reciclado proviene de dos fuentes principales asociadas a los residuos. En primer lugar, los residuos producidos por el propio proceso de construcción o de prefabricación y, en segundo, a la propia demolición o desmantelamiento de estructuras existentes. Independientemente de otros factores, estos orígenes inducen diferentes características en los áridos reciclados.

2.1.5. Residuos en la fase de demolición. Demolición selectiva

La operación de demolición se debe plantear de forma que permita la reutilización del máximo volumen de componentes y materiales. La manera de mejorar la calidad del residuo de demolición es la demolición selectiva. En edificación la demolición selectiva es fundamental para el aprovechamiento de los residuos Fig. 2. Pero, son varios los factores que condicionan el poder llevar a cabo este propósito. Entre otros se pueden destacar la accesibilidad, el tiempo disponible y el coste global de la actuación.



Fig. 2 Demolición de un edificio con estructura de hormigón.

Otra cuestión importante que puede limitar la demolición selectiva es el tiempo necesario para su realización. Este factor puede venir limitado por las autoridades en áreas urbanas. Se lleva a cabo con el fin de separar y prevenir la mezcla de materiales perjudiciales como madera, cartón, plásticos, etc. De esta manera, los escombros procedentes de obras de ingeniería civil presentan menos contaminación. Los escombros procedentes de edificación, si no se realiza de manera selectiva, el proceso de separación y selección se realiza, posteriormente, en la planta de reciclaje con el consiguiente aumento de costes.

El proceso de demolición selectiva ideal sería el desmantelamiento en el siguiente orden: primero las molduras y sacando los desechos, a continuación la carpintería de taller (puertas, ventanas), la cubierta y las instalaciones (agua, saneamiento gas, etc.) y posteriormente demolición de tabiquería y por última la estructura.

Los aspectos que condicionan el coste son también decisivos. Cuando los costes del procesamiento de los materiales mezclados son superiores a los del tratamiento de los materiales separados, se presenta una clara ocasión de aplicar la demolición selectiva. Asimismo, los costes de transporte y también de vertido, siempre que sea permitido, tienen también un papel importante. La imposición de restricciones o la aplicación de tasas elevadas por el vertido fomentan el reciclaje, e indirectamente, la demolición selectiva.

La demolición selectiva es más cara que los métodos tradicionales de demolición, por ello, la incidencia inmediata en el coste de procesamiento puede ser muy importante respecto a la adopción de otros sistemas.

La demolición de productos de desecho en una empresa de prefabricados de hormigón es óptima, ya que son los propios prefabricados no reutilizables los que se aprovechan en su totalidad y además se conoce su procedencia.

Por tanto, es de relevante importancia que demolición y reciclaje sean considerados conjuntamente. Cabe destacar que la demolición selectiva facilita la obtención del futuro árido reciclado, permite una preselección según la calidad del hormigón a demoler además de favorecer la uniformidad de ésta.

2.1.6. Proceso general de producción de áridos reciclados gruesos procedentes de RCD

Las características del AR que se puede obtener y la homogeneidad de sus propiedades están estrechamente ligadas con las correspondientes características del hormigón original, por lo que conocer la historia de los mismos es de gran relevancia para evaluar el material de demolición.

La producción de áridos reciclados procedentes de residuos de hormigón se realiza de forma similar al proceso que se emplea para producir áridos naturales machacados^{19 20}.

¹⁹ Bustillo, M. (2010). Manual de RCD y áridos reciclados. Madrid, ibid.

²⁰ Sánchez, M., Alaejos, P. and Geraldés, L. (2010). "Conclusiones sobre reciclado de residuos de la construcción y demolición como áridos para hormigones no estructurales." Ithobe.

Las plantas que se emplean con dicha finalidad incorporan varios tipos de trituradoras, tamizadoras y equipos para eliminar los residuos no deseados. Si los residuos son seleccionados adecuadamente en origen, los sistemas de eliminación de materiales no deseados se ven reducidos sensiblemente. Las plantas de producción de áridos reciclados pueden clasificarse en función de su capacidad de transporte, en plantas fijas y móviles, presentando las primeras una capacidad de producción sustancialmente mayor¹². En España, según datos facilitados por GERD²¹ correspondientes al año 2007, el número de plantas fijas y móviles de RCD completamente legalizadas se estima en 135. Estos datos actualizados al año 2011 ascienden a 200 plantas. Actualmente y debido a la crisis en la construcción, muchas de ellas se mantienen y otras han optado por el cierre o reestructuración.

2.1.6.1. Procedencia del AR

La combinación de árido grueso natural y reciclado ha de satisfacer las especificaciones recogidas en el artículo 28º de la Instrucción Española EHE-08 ²². Además, el *ANEJO 15* especifica los requisitos particulares para los AR, aunque si no alcanzan los requisitos mínimos, la combinación con los áridos naturales pueden amortiguar las pérdidas correspondientes comparando, por lo tanto, con las limitaciones establecidas en la instrucción.

Las partidas de árido reciclado deben de disponer de un documento de identificación de los escombros de origen, incluyendo los siguientes aspectos:

- ✓ *Naturaleza del material (hormigón en masa, armado, mezcla de hormigón).*
- ✓ *Planta productora del árido y empresa transportista del escombros.*
- ✓ *Presencia de impurezas (cerámico, madera, asfalto).*
- ✓ *Detalles de su procedencia (origen o el tipo de estructura de la que procede).*
- ✓ *Cualquier información que resulte de interés (causa de la demolición, contaminación de cloruros, carbonatación del hormigón, etc.).*

Es aconsejable separar los áridos reciclados de distintas calidades, es decir, por ejemplo de hormigones de resistencia alta, o de resistencia baja, e incluso los áridos correspondientes a hormigones no estructurales, dado que la influencia en la calidad del nuevo hormigón será mucha.

²¹ GEAR (2010). "Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición." Asociación Española de Gestores de Residuos de la Construcción.

²² EHE-08 (2008). Instrucción Española del Hormigón Estructural. Madrid, Ministerio de Fomento.

Existen estudios donde se recogen resultados y comparativos entre áridos procedentes de hormigón y cerámicos mostrando su mejor comportamiento los áridos procedentes del hormigón²³.

2.1.7. Clasificación de los áridos

2.1.7.1. Clasificación general según su origen

- *Áridos reciclados del hormigón:*

Árido que se obtiene de machacar, cribar y procesar los residuos de hormigón fabricado con cemento de clínquer Portland y áridos naturales en plantas de reciclaje. La composición del hormigón es heterogénea pues éste está compuesto de áridos naturales, cemento, aditivos y adiciones, de modo que el producto resultante no se puede considerar un material uniforme. También hay que tener en cuenta que se permite la presencia de otros productos secundarios hasta una cierta proporción. La Normativa Holandesa, por ejemplo, contempla un contenido mínimo del 80% de hormigón procesado²⁴ con una densidad mínima de 2100 kg/m³.

- *Áridos reciclado cerámicos:*

Árido que se obtiene de procesar residuos con presencia predominante de material cerámico. Por ejemplo, según la Normativa Holandesa²⁵ el 85% de este árido debe tener una densidad superior a 1600 kg/m³ para evitar materiales excesivamente porosos o ligeros.

- *Árido reciclado mixto:*

De manera genérica, como se detalla más adelante, se acepta como árido aquel que debe contener un porcentaje de hormigón superior al 50%, con una densidad seca superior a 2100 kg/m³ y no más del 50% de materiales pétreos reciclados de diferente naturaleza que el hormigón, incluyendo el material cerámico, con una densidad seca superior a 1600 kg/m³.

2.1.8. Clasificación según las diferentes normativas

La procedencia de los áridos reciclados puede ser, como ya se ha comentado, áridos procedentes de hormigón y áridos procedentes de cerámicos y mixtos.

²³ Agrela, F., Sánchez, M., Ayuso, J., Gerales, V. and Jiménez, J. (2011). "Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete." *Construction and Building Material* **25**: 3950-3955.

²⁴Hendriks, C. (2000). *The Building Cycle*, Publication.Aenas Tech Pb,The Netherlands.

²⁵ NEN.5905 (1997). "Aggregate for concrete: Materials with a density of at least 2000 kg/m³."

En el caso de árido de hormigón, éste deriva de un solo tipo de material primario, el hormigón, cuya composición, es heterogénea: pasta de cemento, árido, aditivos y/o adiciones. El CEDEX²⁶ en el año 2008²⁷ propuso un catálogo, para el Ministerio de Medio Ambiente donde se contemplan dos tipos de áridos para la elaboración de hormigones reciclados con ellos. Por un lado árido reciclado proveniente de hormigón y árido reciclado procedente de residuos mixtos cerámicos y hormigón. Será el primero el que estudiaremos en la presente tesis.

Internacionalmente, la primera propuesta normativa en regular el uso de los áridos y el hormigón reciclado, fabricados con los primeros, se redactó en el año 1977 por la BCS²⁸. Posteriormente, también en Japón, se publicaron las Normas: Jis A 5021²⁹.

La RILEM recoge en la guía "*Specifications for concrete with Recycled Aggregates*"³⁰ las características que han de cumplir los áridos reciclados según sea la aplicación que se les desea dar. Se establecen en ella limitaciones en cuanto a la densidad mínima y el porcentaje de partículas de baja densidad (Tabla 2).

Tabla 2 Clasificación de los áridos reciclados según la RILEM¹⁰.

Tipo	Origen
Tipo I	Áridos procedentes mayoritariamente de escombros de fábrica de ladrillo
Tipo II	Áridos procedentes mayoritariamente de escombros de hormigón (contenido de cerámicos <10%).
Tipo III	Áridos compuestos por una mezcla de áridos naturales superior al 80% y áridos TIPO I inferior al 10% (o hasta 20% de árido TIPO II)

En la Tabla 3 se muestra un comparativo entre la Rilem y la Norma Japonesa.

Tabla 3 Resumen de requisitos y comparativo entre RILEM y Japón.

REQUISITOS	RILEM			Japón		
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
Densidad seca (g/cm ³)	≥1,50	≥2,00	≥2,40		>2,20	
Absorción (% peso)	≤20	≤10	≤ 3	≤3	≤5	≤7

²⁶ Centro de estudios experimentales del Ministerio de Fomento Español.

²⁷ CEDEX (2008). Catálogo actualizado de residuos utilizables en la construcción, Ministerio de Fomento.

²⁸ Building Contractors Society of Japan.

²⁹ Jisc (2010). Japanese Industrial Standar Comite.

³⁰ RILEM (First edición 1992). (International Union Of testing and research Laboratories for materials and structures) Recycled aggregates and aggregate concrete. "Recycling of demolished concrete and masonry. RILEM report , 6. T. C. Edited by Hansen, EFN Spon London SE 1 8N.

REQUISITOS	RILEM			Japón		
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
Contenido de material de densidad <math><2,20 \text{ g/cm}^3</math> (% peso)	-	≤ 10	≤ 10			
Contenido de material de densidad <math><1,80 \text{ g/m}^3</math> (% peso)	≤ 10	≤ 1	≤ 1			
Contenido de material de densidad <math><1,00 \text{ g/cm}^3</math> (% peso)	≤ 1	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$			
Contenido de materiales extraños (metales, vidrios) (% peso)	≤ 5	≤ 1	≤ 1			
Contenido de metales (% peso)	≤ 1	≤ 1	≤ 1			
Contenido de materia orgánica (% peso)	≤ 1	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$			
Contenido de finos (<math><0,063\text{mm}</math>) (% peso)	≤ 3	≤ 2	≤ 2			
Pérdida por limpieza (% peso)					<math><1</math>	
Resistencia a heladas (% peso)				<math><12</math>	<math><40/<12</math>	-
Contenido de arenas (<math><4\text{mm}</math>) (%)		≤ 5				
Contenido de sulfatos (SO_3) (%)		≤ 1				
Contenido de material cerámico (% peso)	≤ 100					

Las especificaciones belgas para el uso del árido reciclado³¹ son muy similares a las recomendaciones de la RILEM, estableciendo una clasificación del árido reciclado

³¹ Vincke, J. and Rousseau, E. (1994). "Recycling of Construction and Demolition Waste in Belgium: Actual Situation and future evolution. Demolition and reuse of concrete and Masonry. Proceedings of the third International RILEM Symposium. ." Lauritzen, E.K **First Edition 1994**(London SE 1 8HN): 57-69.

en dos grupos, GBSB-I y GBSB-II, como recoge la Tabla 4. El árido tipo GBSB-I correspondería al árido Tipo I de la RILEM, compuesto principalmente de escombros de fábrica de ladrillo, mientras que el árido GBSB-II es similar al Tipo II, y correspondería a árido procedente mayoritariamente de hormigón.

Tabla 4 Clasificación según la Norma Belga.

TIPO	ORIGEN
GBSB-I	Áridos procedentes de residuos cerámicos
GBSB-II	Áridos procedentes de mayoritariamente de escombros de hormigón

La norma Inglesa BS 8500:02³² "*Specification for constituent materials and concrete*" establece la clasificación del árido según su origen, distinguiendo entre árido procedente de hormigón (**RCA**) y árido reciclado procedente de materiales cerámicos o mezcla de ambos (**RA**). En esta norma no se fija un contenido máximo de árido reciclado, aunque prescribe que el árido obtenido a partir de una combinación de árido natural y árido reciclado deberá cumplir las especificaciones generales que se establecen para el árido natural.

La norma Alemana por su parte, establece cuatro categorías de árido reciclado, en función también de la composición de éste, según los criterios que se recogen en la siguiente Tabla 5.

Tabla 5 Clasificación de los áridos según la Norma Alemana³³.

TIPO	ORIGEN
TIPO 1	Áridos procedentes mayoritariamente de escombros de hormigón o áridos minerales (>90%) y con un contenido máximo de clínker, cerámica y / o gres calcáreo del 10%.
TIPO 2	Áridos procedentes mayoritariamente de escombros de hormigón o áridos minerales ($\geq 70\%$) y con un contenido máximo de clínker, cerámicos y / o gres calcáreo del 30%.
TIPO 3	Áridos procedentes mayoritariamente de escombros de cerámicos ($\geq 80\%$), con un contenido máximo de materiales procedentes de hormigón o áridos minerales del 20%.
TIPO 4	Áridos procedentes de la mezcla de RCD con un contenido mínimo del 80% de material procedente de hormigón, áridos minerales o productos cerámicos.

³² BS-8500-2 (2002). "Concrete complementary British Standard to BS EN 206-1. Part 2: Specification for constituent materials and concrete."

³³ DIN4226-1 (2000). Concrete aggregate.

2.1.9. Áridos reciclados procedentes de la industria de la prefabricación

Siempre que sea posible, tanto en las plantas de hormigón como en las obras, hay que disponer de espacios y equipos que permitan la separación de los residuos de construcción producidos en esta fase. Como en la mayoría de los casos la separación previa es difícil y las cantidades de residuos producidos son pequeñas, suele ser más común llevarlos hasta una planta gestora separadora o de reciclaje. No obstante, los residuos producidos en una planta de prefabricados son más limpios y su gestión puede realizarse en la propia planta.

El empleo de áridos procedentes de la industria de la prefabricación es la manera más directa de autoconsumo dentro de la propia factoría, sin descartar el apoyo de las fuentes de suministro mencionadas en los apartados anteriores.

En España existen dos estudios de aprovechamiento de áridos procedentes de la industria del prefabricado, uno es la empresa Norten PH³⁴ y otro de la empresa Prainsa³⁵.

La procedencia de estos áridos deviene de elementos prefabricados de todo tipo, desde placas alveolares, elementos lineales tipo viga, pilar, cerchas, incluso elementos superficiales como paneles o muro prefabricados. Las resistencias derivadas de estos elementos prefabricados estructurales se encuentran entre 30 y 60 MPa.

Otros autores³⁶ han realizado estudios triturando elementos prefabricados de hormigón de clases de resistencia C35/45 y C40/50, utilizada en soportes, vigas muy largas, y otros elementos similares a los anteriormente descritos. Lógicamente una mayor economía puede ser contemplada en un solo proceso de trituración.

La secuencia de trituración más adecuada es aquella que incluye en un primer lugar, una machacadora de mandíbula para reducir los tamaños de RCD hasta 50/60 mm, para posteriormente utilizar un molino de impactos o un molino de conos, para reducir las partículas a 20 mm o menos, (Nagataki et al.³⁷), con ello el rendimiento final supone un 45% de árido grueso y un 55% aproximadamente de árido fino.

³⁴ Setién, J. and Thomas, C. (2010). Reutilización de residuos de Hormigón de una planta de prefabricados: Norten PH. Cantabria, Universidad de Cantabria.

³⁵ Pérez Benedicto, J. A. (2011). Estudio experimental sobre propiedades mecánicas del hormigón reciclado con áridos procedentes de la no calidad. Departamento de construcciones Madrid, Universidad Politécnica de Madrid.

³⁶ Soares, D., De Brito, J., Ferreira, J. and Pacheco, J. (2015). "Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance(Construction and Building Materials (2014) 71 (263-272))." *Construction and Building Materials* **100**: 315.

³⁷ Nagataki, S., Gokce, A., Saeki, T. and Hisada, L. (2004). "Assesment of recycling process induce damage sensitivity of recycled concrete aggregates." *Cement and concrete research* **34**: 965-971.

2.2. RELACIÓN DE PLANTAS DE ÁRIDOS RECICLADOS EN CASTILLA Y LEÓN

El proyecto ecoáridos es una iniciativa a través de varios organismos como la Junta de Castilla y León, Inmoempresa y fondos FEDER, para los Gestores de RCD implantados en Castilla y León, con el objetivo de estudiar, caracterizar técnicamente y estandarizar los áridos reciclados obtenidos a partir de procesos de reciclaje.

2.2.1. Producción de las plantas de reciclaje de Castilla y León

Las Fig. 3 representan el porcentaje de plantas de tratamiento de residuos en la comunidad de Castilla y León y su ubicación por provincias.

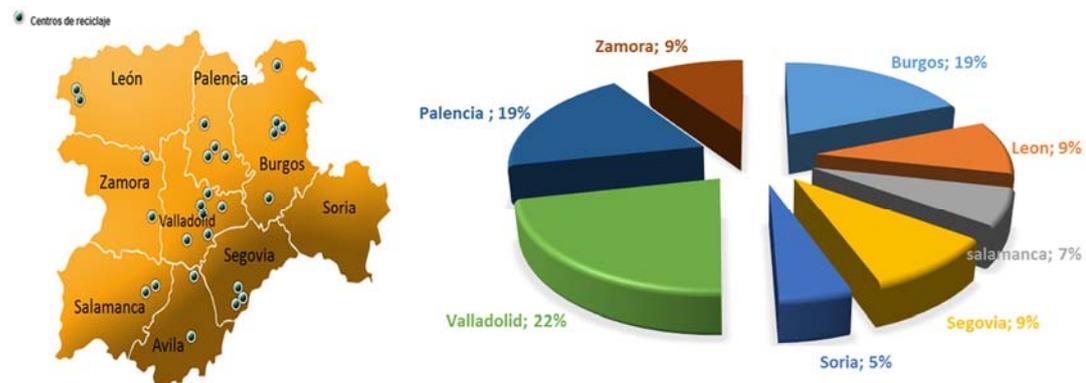


Fig. 3 Plantas de tratamiento de residuos procedentes de demolición y construcción por provincia comunidad CYL y porcentaje en producción por provincias.³⁸

2.2.2. Tipología de los áridos según el proyecto Ecoáridos Castilla y León

La tipología de los áridos reciclados de la comunidad de Castilla y León es la siguiente:

- **ECOÁRIDO MX-1:** Zahorra mixta procedente del cribado final de la línea de proceso de RCD MIXTO, con contenidos en cerámicos superiores al 35%.
- **ECOÁRIDO MX-2:** Zahorra mixta procedente del cribado final de la línea de proceso de RCD MIXTO, con mezcla de contenidos en cerámicos ($\leq 35\%$), pétreos y de restos de hormigón. Contenido en asfalto $< 5\%$.
- **ECOÁRIDO HR:** Zahorra procedente de forma exclusiva del cribado final de la línea de proceso de RCD HORMIGÓN, con contenidos en hormigón superiores al 90%. Contenido en asfalto $< 5\%$.

³⁸ ECOARIDOS (2005). Proyecto ecoaridos Junta Castilla y León.

- **ECOÁRIDO PT:** Zahorra procedente de forma exclusiva del cribado final de la línea de proceso de RCD MIXTO, con contenidos en compuestos no cerámicos superiores al 90%. Contenido en asfalto <5%.
- **ECOÁRIDO S-HR:** Fracción fina (arena) procedente de la criba primaria del proceso de RCD HORMIGÓN.
- **ECOÁRIDO S-MX:** Fracción fina (arena) procedente del cribado final en el proceso de la línea de RCD CERÁMICO/MIXTO, una vez sometido a los ciclos de limpieza del proceso.
- **SUBPRODUCTO TV:** Fracción fina procedente de la criba primaria del proceso de RCD MIXTO. Requerirá de estudios específicos que permitan su mejora en cuanto a valores de pH, contenido en materia orgánica y las sales solubles asimilables, así como su inocuidad para su empleo en labores de restauración

2.2.3. Plantas de tratamiento de RCD en la provincia de Burgos

El proceso general productivo se sintetiza en la Fig. 4. La variación de unas plantas a otras dependerá de la inversión realizada, de la posible captación de RCD, etc.

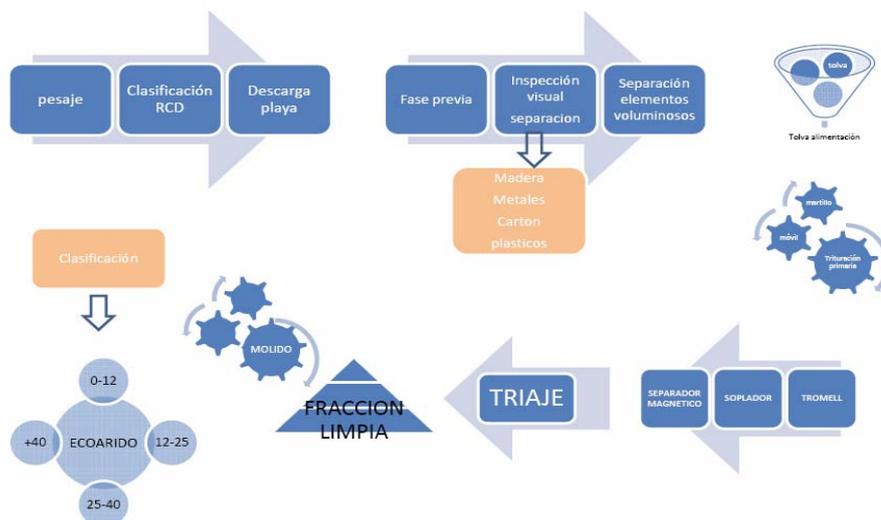


Fig. 4 Proceso general de una planta de reciclado de materiales procedentes de construcción y demolición.

A continuación se describen las centrales de reciclaje más importantes de Burgos y provincia.

2.2.3.1. Planta Resbur

La planta de Burgos de Resbur está situado en camino Carcedo s/n de Burgos. Es una concesión del ayuntamiento de Burgos a una UTE de tres empresas (Excavaciones Saiz, Hormigones Temiño y Excavaciones Julio). En la Fig. 5 se muestran las instalaciones de la misma, teniendo las siguientes características:

Producción: 800 t/año.

Características y proceso: Triaje previo, trituradora mandíbulas, cribado primario, separador magnético, triaje secundario y trituradora de impactos regulable.



Fig. 5 Centro de tratamiento de áridos RESBUR. De izquierda a derecha, trituradora de mandíbulas, cinta separador magnético, cabina de triaje (UTE Excavaciones Saiz, Hormigones Temiño y Excavaciones Julio).

La producción de áridos según la tipología del proyecto Ecoáridos, para un ecoáridos mixto de tamaño 20/80 mm y Subproducto TV se muestra en la Fig. 6.



Fig. 6 Tipos de árido que produce RESBUR: ecoáridos MX-1 20-80, Subproducto TV.

Se dispone de zavorra mixta, Ecoárido MX-1, apta para rellenos en carreteras atendiendo la normativa correspondiente.

La producción de Ecoárido HR con proporción mayor de 95% procedente de hormigón se realiza bajo pedido ya que existe poca demanda del mismo.

2.2.3.2. Planta de residuos IGLECAR

Situada en la población de Cardeñadijo (Cercana a Burgos).

Producción: 1600 t/año

Se trata de una planta con capital privado que recibe residuos procedentes de demoliciones ya que tiene fuente propia de suministros de contenedores para tal efecto, Fig. 7.



Fig. 7 Planta tratamiento residuos IGLECAR .

La calidad y organización de su proceso se encuentran es óptimo.

La tipología de áridos que produce es la siguiente:

- Ecoárido MX-1 de tamaño 20/50 mm (Mixto aplicación zahorras rellenos). Aplicación bases y sub-bases de carreteras (Fig. 8).
- Ecoáridos MX-1 de tamaño 40/60 mm. (Mixta u Hormigón procedente de machaqueo y cribado final) Aplicación a bases y sub-bases de carreteras (Fig. 8).
- Ecoáridos MX-2 de tamaño 25/50 mm (Mixta u Hormigón procedente de machaqueo y cribado final). Aplicaciones en rellenos (Fig. 8)
- Subproducto TV tamaño 0/10 mm para aplicación de bases de canalización de tuberías de abastecimiento o evacuación (Fig. 8)



Fig. 8 Áridos empleados en Iglecar.

2.2.3.3. Planta de residuos y excavaciones PÉREZ PÉREZ SL

Dirección: Ctra. Madrid Irún, Km 230-Via de Servicio. Villariezo (Burgos)

Autorización: GRNPCL10/09

Capacidad de producción: 5000 t/año

Producción y tipología de los áridos que produce:

- Ecoáridos HR 0/60 mm procedente del final de proceso de valorización (ECOARIDO HR) cuya producción es bajo pedido.
- Ecoáridos MX-1 de tamaño 20/60 mm procedente del final de proceso de valorización.

El proceso es bastante simple organizando su producción a partir de una separación con retroexcavadora y posterior trituración con machacadora o trituradora móvil (Fig. 9). La producción y el tipo de árido que procesa está prácticamente destinado para su propio suministro en trabajos de obra civil, que realiza a través de su filial de excavaciones.



Trituradora móvil



Ecoáridos 0-60 mm

Fig. 9 Esquema de tratamiento de residuos planta Pérez-Pérez.

2.2.3.4. Planta de tratamiento de residuos en Miranda de Ebro. Residuos y Reciclajes Miranda SL.

Situación: Carretera Ayuelas 2, parcela 2 polígono 7, la planta está situada en la localidad de Miranda de Ebro.

Los medios de producción son: cribado primario, machacadora de mandíbulas, tromel y cribador secundario, separador magnético y triturador móvil, siendo sus áridos que producen los siguientes:

- Ecoárido MX-1 de tamaño 20/50 mm (Mixto cuyas aplicación son zahorras y rellenos) Aplicación bases y sub-Bases de carreteras.
- Ecoáridos PT-2 de tamaño 10/40 mm (Mixta u Hormigón procedente de machaqueo y cribado final). Aplicación en soleras de hormigón así como en el carril bici de Miranda de Ebro.

2.2.3.5. Planta de residuos grupo Gerardo de la Calle en Aranda de Duero

Se ha realizado visita a la empresa Grupo Gerardo de la Calle, la cual tiene diversificadas sus actividades en:

- Planta o central de suministro de hormigones. Aplicación a hormigón estructural para todo tipo de obras de edificación.
- Plantas de elaboración de prefabricados de edificación y naves industriales, ARTEPREF SL, aplicación en hormigón estructural.
- Planta de elaboración de prefabricados con hormigón no estructural como bloques de hormigón, etc.
- Planta de tratamiento de residuos procedentes de RCD.

La planta de tratamiento es la única planta en un radio de 70 km. Y sus instalaciones son modernas (Fig. 10).



Fig. 10 Factoría tratamiento de RCD del Grupo Gerardo de la Calle en Aranda de Duero.

La planta está infrautilizada debida a la poca demanda de áridos produciendo únicamente un Ecoárido MX-1 de tamaño 10/60 mm y Subproducto TV 0/10 mm para aplicación como relleno de zanjas (Fig. 11).



Fig. 11 Ecoáridos producidos por grupo Gerardo de la Calle.

2.2.3.6. Otras plantas

Se ha contactado con el responsable de la planta de tratamientos de residuos RCD de Vitoria, UTE RCD Gardelegui 2005. Se trata de una de las plantas más importantes tecnológicamente del Norte de España. El esquema de la planta se refleja en la Fig. 12.



Fig. 12 Esquema planta de tratamiento de Vitoria. (Fuente cortesía UTE Gardelegui).

Los tipos y cantidades de áridos producidos en un semestre se expone en la Tabla 6.

Tabla 6 Resultados de explotación anuales medios.

Tipos de áridos reciclados	Suministro	Producción (t)
Arenas (0-5 mm)	acopio	
Finos (0-10 mm)	acopio	
Árido reciclado 0-40 mm de Hormigón	acopio	
Árido reciclado 0-40 mm de RCD heterogéneos	vendido	71000
Árido reciclado 10-40 mm de RCD heterogéneos	acopio	
Árido reciclado 40-60 mm de RCD heterogéneos	vendido	85010
Árido reciclado >40 mm de RCD heterogéneos	acopio	

La aplicación fundamental, lo mismo que otras centrales de tratamiento analizadas, están destinadas como aplicaciones de: zahorra artificial, relleno de zanjas y rellenos en general.

2.3. PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS

2.3.1. El árido reciclado

Se entiende por árido reciclado aquel "árido resultante del procesamiento de RCD" tal y como recoge el proyecto de norma, prEN 12620³⁹ "Aggregates for concrete" de abril 2002 y prEN4 13242⁴⁰ "Aggregates unbound and hydraulically bound for use in civil engineering Works and road construction" en su versión de Mayo de 2002.

2.3.2. Propiedades geométricas de los áridos reciclados

La distribución granulométrica tiene mucha importancia debido a su efecto directo sobre las propiedades del hormigón, como la trabajabilidad, la porosidad, la permeabilidad, la resistencia, el grado de compactación y la durabilidad⁴¹. Una distribución continua indica que el árido está uniformemente graduado para todos los tamaños, lo que permite un mayor abanico de posibilidades de interacción entre las partículas y proporciona un grado de compacidad y una resistencia mecánica más elevados⁴².

La EHE-08 especifica las distribuciones granulométricas óptimas para gravas, arenas o que pueden ser utilizadas para la fabricación de hormigón. Es necesario que la relación D/d , donde D y d son las dimensiones máxima y mínima del árido respectivamente, sea superior a 1,4.

La granulometría de los áridos reciclados varía según el proceso de trituración que se realice, y puede ser modificada mediante pequeños ajustes de la apertura de las trituradoras. El porcentaje de árido grueso que se obtiene suele variar entre el 70% y el 90% del árido total producido. Este porcentaje depende, también, del tamaño máximo del árido grueso reciclado producido y de la composición del residuo original. La fracción gruesa tiene, en general, una curva granulométrica adecuada, que se puede englobar dentro de los husos granulométricos que recomiendan algunas normas internacionales⁴³ e incluso la actual instrucción EHE-08. Estudios llevados a

³⁹ prEN-12620 (2002). Aggregates for concrete.

⁴⁰ prEN-3242 (2002). Aggregates unbound and hydraulically bound for use in civil engineering Works and road construction .

⁴¹ Tam, V. and Wang, K. (2007). "Assessing relationship among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis." Hazard Materials **152**(57): 703-714.

⁴² BS-8500-2 (2002). "Concrete complementary British Standar to BS EN 206-1. Part 2: Specification for constituent materials and concrete."

⁴³ ASTM-33-08 (2008). Standar specification for concrete aggregates. S. Coshohoken. USA, DIN-1045-1 (2008). Concrete, reinforced concrete and prestressed concrete structures. Part 1 Design and Construction. B. V. GmbH. Berlin.

cabo sobre la idoneidad de empleo de diversos procedimientos granulométricos⁴⁴, sostiene que los métodos de Fuller y Bolomey, requieren tamaños máximos de árido menores, como el definido en la anterior EHE de 1998. Dicho estudio concluye sobre la importancia de que los productores de AR modifiquen su proceso de fabricación, con el fin de producir una granulometría que demande el sector y que resulte de calidad para competir con los áridos naturales.

2.3.3. Porcentaje de finos y de partículas de tamaño inferiores a 4 mm

Durante la manipulación del AR, y debido a su friabilidad, se desprenden pequeñas partículas de mortero que influyen en el porcentaje de finos. Según algunos ensayos de estudios españoles⁴⁵ como consecuencia de estos desprendimientos, la generación de finos sobre fracciones gruesas ya clasificadas en laboratorio pueden variar un 0,27 % y 1,14%, quedando en la mayoría de los casos por debajo del 1% límite que establece la EHE-08 como máximo admisible.

Estas partículas finas caracterizadas por presentar un elevado contenido en mortero, originan unas peores propiedades que afectan negativamente a la cantidad de hormigón provocando un aumento del agua de amasado y disminuyendo la adherencia entre el árido y la pasta de mortero.

Las recomendaciones o normas que incluyen especificaciones sobre esta propiedad, Norma Belga⁴⁶, Inglesa⁴⁷, Alemana⁴⁸ y recomendaciones de Hong Kong⁴⁹, establecen un límite de partículas finas (< 0,063 mm) más alto, admitiendo entre un 2% y un 5% favoreciendo así el cumplimiento de esta especificación.

Después de obtener la fracción gruesa, el árido sigue presentando porcentajes de finos, debido a la disgregación del árido al manipularse, con valores que oscilan entre 0,5 y 2%.

⁴⁴ Martín-Morales, M., Sánchez-Roldan, S., Zamorano, P., Valverde, S. and Palacios, T. (2013). "Métodos granulométricos en la caracterización del árido reciclado para uso en hormigón estructural." *Materiales de Construcción* **63**(310): 235-249.

⁴⁵ Sánchez, M., Alaejos, P. and Gerales, L. (2010). "Conclusiones sobre reciclado de residuos de la construcción y demolición como áridos para hormigones no estructurales." *Ihobe*.

⁴⁶ Vincke, J. and Rousseau, E. (1994). "Recycling of Construction and Demolition Waste in Belgium: Actual Situation and future evolution. Demolition and reuse of concrete and Masonry. Proceedings of the third International RILEM Symposium. ." Lauritzen, E.K **First Edition 1994**(London SE 1 8HN): 57-69.

⁴⁷ BS-8500-2 (2002). "Concrete complementary British Standard to BS EN 206-1. Part 2: Specification for constituent materials and concrete."

⁴⁸ DIN4226-1 (2000). Concrete aggregate.

⁴⁹ Hong-Kong (2002). "Specifications Facilitating the Use of Recycled Aggregates " Works Bureau Technical Circular 12/2002.

La EHE admite como porcentaje máximo de desclasificados (partículas inferiores a 4 mm) el 10%, valores superiores a los admitidos por las recomendaciones Rilem⁵⁰, donde se establece el 5% como límite máximo.

2.3.3.1. Mortero adherido

La cantidad de mortero adherido en los áridos reciclados es la diferencia fundamental con respecto a los áridos naturales. Dicho mortero según los trabajos llevados a cabo por González Fuenteboa⁵¹ hace que los áridos reciclados presenten propiedades distintas a los naturales, provocando aumento de absorción de agua, menor densidad, menor dureza y menor resistencia a la fragmentación respecto a los áridos naturales. El porcentaje de mortero adherido depende en gran medida de la relación agua/cemento (w/c) del hormigón de origen.

El porcentaje de pasta residual es mayor en áridos procedentes de machaqueo que los áridos de río (más redondeados). Existen métodos para evaluar la cantidad de mortero adherido por diferencia de pesaje entre árido original y árido limpio.

Las fracciones gruesas (10-25 mm) presentan menos proporción de mortero adherido que las fracciones finas (5-10 mm) que pueden llegar hasta un 50%⁵². Esto repercute en peores propiedades. A través de ensayos realizados se ha comprobado que la resistencia del hormigón original apenas influye en la cantidad de mortero adherido al árido grueso, obteniéndose valores ligeramente superiores en áridos procedentes de hormigones de mayor resistencia (menor relación w/c)⁵³, si bien puede haber mayores contrastes para hormigones que en origen tengan resistencias menores a 25 MPa, y en cualquier caso, el criterio de resistencia proporciona resultados conservadores⁵⁴.

Como no existe procedimiento normalizado de ensayo para la determinación de la cantidad de mortero adherido, los resultados existentes en la bibliografía presentan importantes diferencias. En la Tabla 7 se expone un comparativo con los resultados de dos investigadores.

⁵⁰ RILEM (2006). "(International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures) Specifications for Concrete with Recycled Aggregates." Materials and Structures.

⁵¹ González Fuenteboa, B. and Martínez, F. (2005). "Hormigones con áridos reciclados: Estudio de las propiedades de los Áridos y de las Mezclas." Materiales de Construcción.

⁵² Barra, M. (1996). Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón estructural. Departamento de construcciones. , Universidad Politécnica Cataluña, *ibid*.

⁵³ Sánchez, M. and Alaejos, P. (2009). "Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate." *Construcción and Building Material* **23**: 872-877.

⁵⁴ Sánchez, M. (2004). Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. Tesis. Departamento de Ingeniería Civil. Madrid, ETS Caminos Madrid: 474.

Tabla 7 Comparativo entre diferentes tamaños de árido.

Autor	Tamaño AR (mm)	Mortero adherido (%)
Domingo, A ⁵⁵	4/8	31,5
	8/20	18,0
Sánchez, M ⁵⁶	4/8	55/36
	8/20	44/25

2.3.3.2. Forma y textura del árido reciclado

La forma del árido se puede determinar por dos procedimientos, coeficiente de forma o índice de lajas. Cuando el estudio se determina mediante el coeficiente de forma⁵⁷, el AR presenta valores similares al del árido natural, con un rango entre 0,17 y 0,35.

Si se determina la forma del árido mediante el método del Índice de lajas⁵⁸, el AR presenta valores inferiores al del árido natural, debido probablemente a que el mortero que queda adherido en las caras planas de las partículas disminuye la forma de laja, aumentando su espesor. Las partículas de árido reciclado son más angulosas⁵⁹. Sin embargo, también en otros estudios, los AR son más redondeados debido a que la mayor friabilidad de la pasta adherida provoca que se desgaste redondeando el árido⁶⁰. Los valores medios que presentan los áridos reciclados procedentes del hormigón oscilan entre el 5% y el 9%, cumpliendo el límite establecido en la EHE de 35%. Las únicas recomendaciones que establecen una especificación para esta propiedad son las de Hong Kong⁶¹, que fijan un valor máximo del índice de lajas del 40%.

La presencia del mortero que queda adherido a los áridos del hormigón original provoca que la textura de los áridos reciclados sea más rugosa y porosa que la de los áridos naturales.

⁵⁵ Domingo, A., Lázaro, C., Gayarre, F. and Serrano, M. (2009). "Long term deformations by creep and shrinkage in recycled aggregate concrete." *Materiales and Structures* **47**(8): 1147-1160.

⁵⁶ Sánchez, M. (2004). Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. Tesis. Departamento de Ingeniería Civil. Madrid, ETS Caminos Madrid: 474.

⁵⁷ UNE EN 933-4. (2006) Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos Parte 4 Determinación de la forma de las partículas. Coeficiente de forma.

⁵⁸ UNE EN 933-3. (2006). Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos Parte Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas.

⁵⁹ Vincke, J. and Rousseau, E. (1994). "Recycling of Construction and Demolition Waste in Belgium: Actual Situation and future evolution. Demolition and reuse of concrete and Masonry. Proceedings of the third International RILEM Symposium. " Lauritzen, E.K **First Edition 1994**(London SE 1 8HN): 57-69.

⁶⁰ Thomas, C. (2010). Hormigón reciclado de aplicación estructural: Durabilidad en ambiente marino y comportamiento a fatiga. Ciencia e ingeniería del terreno y los materiales. Santander, Cantabria: 356, ibid.

⁶¹ Hong-Kong (2002). "Specifications Facilitating the Use of Recycled Aggregates " Works Bureau Technical Circular 12/2002.

2.3.4. Propiedades físicas y mecánicas del árido reciclado

La densidad del árido reciclado suele oscilar entre 2100 y 2400 kg/m³, mientras que la densidad saturada con superficie seca varía entre 2300 y 2500 kg/m³, de manera que en todos los casos se pueden considerar estos áridos de densidad normal (no ligeros), porque presentan una densidad superior a 2000 kg/m³, según establece la norma UNE⁶². La absorción es una de las propiedades físicas del árido reciclado que presenta una mayor diferencia con respecto al árido natural, debido a la elevada absorción de la pasta de cemento que queda adherida al árido natural y en su caso de los cerámicos. Los valores habituales de absorción, según Sánchez de Juan⁶³, están comprendidos entre el 4-10% en peso, incumpliendo en muchos de los casos el límite del 5% que establece la EHE-08.

Los principales aspectos que influyen tanto en la densidad como en la absorción del árido reciclado son:

- El tamaño de las partículas: las fracciones más pequeñas presentan menor densidad y una mayor absorción (para un mismo origen) que las fracciones más gruesas⁶⁴.
- La calidad del hormigón original: los hormigones de baja relación w/c (y por tanto de elevada resistencia), suelen dar lugar a áridos reciclados de más calidad, y por tanto con mayor densidad y menor absorción. Diversos estudios ⁶⁵ ⁶⁶ demuestran que una misma planta que procese hormigones de diferente calidad (10-50 MPa) puede producir áridos con un rango del coeficiente de absorción muy amplio (entre 10% y 5% respectivamente).
- Las técnicas de procesado: cuando en el procesamiento del árido grueso reciclado se realiza en sucesivas etapas de trituración, se elimina un mayor contenido de mortero y la calidad del árido mejora sustancialmente, observándose un descenso de la absorción y un incremento de la densidad, que pueden alcanzar valores cercanos a los del árido natural. Al

⁶² UNE-146.120:97 "Áridos para Hormigones. Especificaciones".

⁶³ Sánchez, M. (2004). Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. Tesis. Departamento de Ingeniería Civil. Madrid, ETS Caminos Madrid: 474.

⁶⁴ Barra, M. (1996). Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón estructural. Departamento de construcciones. , Universidad Politécnica Cataluña.

⁶⁵ Gómez-Soberón, J. M. (2002). "Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate, an experimental study." *Cement & Concrete Research* **32**: 1301-1311.

⁶⁶ Tam, V. and Wang, K. (2007). "Assessing relationship among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis." *Hazard Materials* **152**(57): 703-714.

igual que la absorción, la porosidad del AR presenta desventajas con respecto al árido natural.

Por otra parte, la absorción es una de las principales características que diferencia al árido natural y reciclado y por tanto influye a la hora de fabricar hormigón con relación al tamaño de partícula. Las fracciones más finas siempre tienen una mayor absorción que las fracciones más gruesas, ya que las primeras concentran mayor contenido de mortero adherido.

En la Tabla 8 se incluyen estudios acerca de la relación entre el tamaño de partícula y la absorción del agua del árido reciclado⁶⁷.

Tabla 8 Relación entre el tamaño de partícula y la absorción del agua del AR.

Tipo árido	Granulometría (mm)	Absorción de agua (% peso)
Grava natural	4-8	3,7
	8-16	1,8
	16-32	0,8
Árido reciclado (w/c=0,4)	4-8	8,5
	8-16	5,0
	16/32	3,8
Árido reciclado (w/c=0,4)	4/8	8,7
	8/16	5,4
	16/32	4,0

Gran parte de los estudios han obtenido unos resultados de absorción menores del 4% cuando se han empleado varios procesos de trituración, lo que elimina una mayor cantidad de mortero adherido.

Según las especificaciones de la RILEM, para los Tipos I y II se establecen unos requisitos más tolerantes tanto en absorción como en densidad, mientras que si se utiliza el árido reciclado en combinación con árido natural (Tipo III) se realiza el control al árido conjunto (mezcla de árido natural y árido reciclado), sin controlar directamente el árido reciclado, pero estableciendo requisitos de absorción más restrictivos a la mezcla. Según estas recomendaciones, tanto el árido reciclado Tipo II como el Tipo III pueden utilizarse en hormigón en masa y hormigón armado. Para el árido Tipo III no se establece limitación a la resistencia del hormigón y por el árido

⁶⁷ Hansen, T. C. and Narud, S. (1983). "Strenght of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate." ACI INTERNATIONAL 8: 79-83.

Tipo II se limita la clase resistente a H-50, siempre que se cumplan los requisitos adicionales de durabilidad cuando el hormigón haya de estar expuesto a ambientes agresivos.

Las especificaciones Belgas exigen al primer grupo de áridos, GBSB-I, una absorción inferior al 18% y el segundo, GBSB-II, una absorción máxima del 9%. Las aplicaciones de este último tipo se limitarían a hormigones de clase resistente H-30 para interiores y ambientes no agresivos. Estas especificaciones, aunque siguen la misma tendencia que la RILEM, son menos tolerantes tanto en la calidad de árido como en la calidad del hormigón reciclado.

Estudios españoles y la EHE-08 indican que un límite recomendable para la absorción del árido reciclado sería del 7%. Este límite selecciona áridos reciclados de mayor calidad, que además presentarán un menor coeficiente de Los Ángeles, un menor contenido de finos y de partículas ligeras.

En cuanto a los áridos mixtos, la absorción es una de las propiedades físicas que presenta una mayor diferencia con respecto al árido natural. La mayor parte de las normas internacionales establecen límites a la absorción de los áridos reciclados mixtos, si bien no hay consenso entre ellas, variando entre un 12% y un 20%, muy por encima del límite establecido actualmente en la EHE-08 del 7% tanto para hormigones estructurales como no estructurales.

La absorción de agua de los áridos reciclados mixtos analizados en el estudio del proyecto CLEAM varía entre un 2% y un 14% considerando las 36 muestras analizadas. Sólo el 38% de estas muestras cumplen el límite del 7% de absorción. Aseguran, por tanto, que debería establecer un nuevo límite más adecuado para las aplicaciones no estructurales, siempre que se garantice una calidad adecuada del hormigón, y así se permita dar salida para esta aplicación a un mayor volumen de material granular reciclado.

Además de la absorción, las normativas establecen también límites a la densidad seca de los áridos reciclados, entre 1500 y 1600 kg/m³ para los áridos cerámicos, y una densidad mínima de 1800 kg/m³ para los áridos mixtos. Todos los resultados experimentales del grupo CLEAM cumplen estos requisitos, en cambio, otros valores recopilados en el estudio bibliográfico presentan densidades inferiores y absorciones, en general, superiores a las recomendadas.

De igual forma que en el resto de propiedades del árido reciclado, el tipo de proceso influye de forma importante en el comportamiento frente a la helada. Con un

único proceso de trituración realizado con machacadora de impacto se consiguen pérdidas de masa en el árido grueso entre 23-32%. Con dos procesos sucesivos de trituración se llega a valores de 6-16%, reduciéndose hasta el 6-10% cuando se incrementa la energía de trituración y se lava el árido, pudiendo llegar a conseguir áridos reciclados con un comportamiento cercano al árido natural⁶⁸.

La resistencia a la helada se evalúa habitualmente mediante la comprobación del contenido de sulfato de magnesio, de acuerdo con la Norma UNE⁶⁹. La muestra se somete a esfuerzos tensionales repetidos de cristalizaciones y rehidrataciones del sulfato de magnesio en los huecos del árido. La disgregación producida por dichos esfuerzos se mide por la cantidad de material con granulometría inferior a 10 mm. Estudios consultados^{70 71} presentan valores de pérdida de peso de 2-22%, incumpliendo en ocasiones el límite máximo establecido por la EHE-08 del 18%.

En general el AR no presenta un buen comportamiento a las heladas por lo que su empleo en estructuras expuestas a climas extremos no es recomendable a no ser que se utilicen relaciones w/c bajas.

El árido reciclado presenta un elevado coeficiente de **Los Ángeles** ya que durante el ensayo se elimina todo el mortero que queda adherido al árido, además de la pérdida de peso propia del árido natural, según Sánchez et al.⁷².

El valor esperado del árido reciclado es superior al del árido natural y puede situarse en un rango amplio, entre 25-45%⁷³, dependiendo de otros factores como el tamaño de la partícula y la calidad del hormigón original, así como del propio coeficiente de Los Ángeles del árido natural que contenga.

Generalmente el coeficiente de Los Ángeles aumenta en las fracciones de menor tamaño, ya que son las que representan un mayor porcentaje de mortero adherido al árido natural. Al disminuir la relación w/c del hormigón original, el coeficiente de Los Ángeles también aument y se pueden encontrar diferencias en el valor del coeficiente

⁶⁸ ACHE (2006). Comisión 2 Grupo de trabajo 2/5. Utilización del árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural. Madrid, ACHE: Asociación Científico Técnica del Hormigón Estructural. Utilización del árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural.

⁶⁹ UNE EN 1637-2:1999 "Ensayo para determinar las propiedades térmicas y de alteración de los áridos. Parte 2 Ensayo de sulfato de magnesio.

⁷⁰ Sánchez, M. (2004). Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. Tesis. Departamento de Ingeniería Civil. Madrid, ETS Caminos Madrid: 474.

⁷¹ ACHE (2006). Comisión 2 Grupo de trabajo 2/5. Utilización del árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural. Madrid, ACHE: Asociación Científico Técnica del Hormigón Estructural. Utilización del árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural.

⁷² Sánchez, M. and Alaejos, P. (2009). "Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate." *Construction and Building Material* **23**: 872-877.

⁷³ Sánchez, M., Alaejos, P. and Galdes, L. (2010). "Conclusiones sobre reciclado de residuos de la construcción y demolición como áridos para hormigones no estructurales." *Ihobe*.

de hasta un 10% en los resultados correspondientes a un amplio rango de relaciones w/c (0,3-0,6).

Otros estudios relacionan el comportamiento mecánico de los áridos relacionado con el índice de machacabilidad, estableciendo limitar el coeficiente de Los Ángeles, ya que a medida que aumenta éste, aumenta la deformabilidad del hormigón y puede bajar la resistencia. También se concluye que el efecto negativo que supone la incorporación del AR afecta en menor medida a hormigones con relación w/c menores y, por la tanto, pastas (matriz cementicia) más competentes⁷⁴.

2.3.5. Requisitos químicos

2.3.5.1. El contenido de sulfatos

El AR puede contener un elevado contenido de sulfatos, ya que al propio contenido del árido natural se le añade los sulfatos que contienen el mortero adherido y la presencia de contaminantes como el yeso cuando el hormigón procede de edificación. En principio, los sulfatos presentes en la pasta de cemento, ya combinados durante su hidratación, no van a provocar problemas en el hormigón nuevo, pero si será necesario evitar la presencia de impurezas como el yeso, que podrían producir expansiones en el hormigón. Es por ello que se limita el contenido de compuestos totales de azufre y en este sentido se orientan las recomendaciones⁷⁵.

Según estudios realizados por Sánchez y Alaejos⁷⁶, el contenido de sulfatos solubles en ácido expresados en términos de SO₃, puede oscilar entre 0,10 y 0,62%, mientras que el contenido total expresado en SO₃ es ligeramente superior.

Otras experiencias con residuos de probetas que contienen sulfatos procedentes del refrentado de las mismas⁷⁷.

La EHE-08 limita el porcentaje en contenidos de compuestos totales de azufre expresados en SO₃ al 1% del peso total de la muestra.

⁷⁴ Sosa, I., Thomas, C. and Polanco, J. A. (2011). "Comportamiento mecánico de áridos reciclados para hormigón." *Anales de mecánica de la fractura* 1, *ibid*, *ibid*.

⁷⁵ ACHE (2006). Comisión 2 Grupo de trabajo 2/5. Utilización del árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural. Madrid, ACHE: Asociación Científico Técnica del Hormigón Estructural. Utilización del árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural.

⁷⁶ Sánchez, M. and Alaejos, P. (2010). Aspectos químicos del árido reciclado relacionado con la durabilidad del hormigón. CEDEX.

⁷⁷ Thomas, C., Cimentada, A., Setién, J., Polanco, J. A., Rico, J. and Sosa, I. (2011). "Waste With sulfur from tested concrete specimens as aggregate for structural recycled concrete in:Wastes Solutions treatments and opportunities 1st international conference " 1: 183-189.

2.3.5.2. El contenido de cloruros

El contenido de cloruros que puede presentar el árido reciclado está en función de la procedencia del hormigón usado como materia prima. Para el caso de hormigones que contengan aditivos acelerantes, o los procedentes de obras marítimas, de pavimentos expuestos a sales de deshielo o de puentes, la concentración de cloruros puede ser elevada.

La Instrucción del hormigón estructural EHE-08 determina que para el AR se considere el contenido de cloruros totales en vez del contenido de cloruros solubles como situación más desfavorable, estableciendo una limitación a la cantidad de cloruros solubles en agua del 0,05% para hormigón armado y del 0,03 % en el caso de hormigón pretensado.

2.3.5.3. Reacción álcali-árido

En los hormigones reciclados, la reactividad álcali-árido se controla igual que para los hormigones convencionales. La utilización de AR puede favorecer las reacciones álcali-árido en el hormigón debido, por una parte, al mayor contenido de álcalis que aporta la pasta de cemento adherida al AR y, por otra parte, a la mayor dificultad en el control de la reactividad en los áridos causada por la heterogeneidad y diversa procedencia de este tipo de áridos. Estudios como el BREDigest⁷⁸ recomiendan incorporar cementos con adiciones (cenizas volantes), en aquellos ambientes donde la humedad pueda favorecer la reacción.

Los áridos reciclados presentan un elevado contenido en álcalis, con un porcentaje de óxido de sodio equivalente ($0.65K_2O+Na_2O$) que oscila entre el 1 y 2%. Por ello, para su utilización en ambientes distintos Tipo I y IIb, se recomienda utilizar una única fuente controlada y realizar un estudio complementario de reactividad potencial, tanto del propio árido reciclado como del árido natural que vaya a utilizarse en la muestra.⁷⁹

Otros estudios (Etxeberria et al ⁸⁰) examinan el gel álcali sílice que se produce como resultado de la presencia de árido fino reactivo en el mortero adherido, o la acumulación de cemento de alto contenido en álcalis en la zona de transición (examen mediante microscopía electrónica de la interfase pasta-árido).

⁷⁸ Collins , R. J. (1998). "BRE Digest 433 Recycled Aggregates."

⁷⁹ Sánchez , M. and Alaejos, P. (2010). Aspectos químicos del árido reciclado relacionado con la durabilidad del hormigón. CEDEX.

⁸⁰ Etxeberria, M. and Vázquez, E. (2010). "Alkali silica reaction in concrete induced by mortar adhered to recycled aggregate." *Materiales de Construcción* **60**(297): 47-58.

2.3.5.4. Contaminantes e impurezas.

Según la EHE-08 el árido reciclado para aplicación en hormigón puede contener un 95 % de hormigón y un 5% de otros componentes como plástico, madera, cerámicos asfalto, etc. Fig. 13.



Fig. 13 Porcentaje en peso de componentes de un árido reciclado de hormigón.

Estas impurezas pueden producir en todos los casos descensos en la resistencia, más acentuados si se trata de cal o arcilla y en menor medida si se trata de asfaltos y pinturas ó cerámicos. Otros problemas como reacciones álcali-árido por inclusiones de vidrio, ataque por sulfatos (yeso), desprendimientos superficiales (madera y papel), elevada retracción (arenas arcillosas), o un mal comportamiento hielo-deshielo (ladrillos)⁸¹.

Para determinar el contenido de impurezas en función de su naturaleza pueden consultarse varias Normas Tabla 9.

Tabla 9 Comparativo contenido impurezas entre diferentes Normas.

Impurezas	máximo contenido en impurezas (% peso total muestra)			
	RILEM 1994	BRE 1998	BS-500-2002	EHE-08
Material cerámico	1		5	1
Partículas ligeras			5	5
Asfalto		0,5	0,5	1
Otras impurezas (vidrio, plásticos)	1	1	1	1

⁸¹ Hendriks, C. (2000). The Building Cycle, Publication.Aenas Tech Pb,The Netherlands.

2.4. EL HORMIGÓN RECICLADO

Se han llevado a cabo numerosas investigaciones para encontrar formas de utilizar áridos reciclados en la fabricación de hormigón y en particular, el uso de áridos reciclados de hormigón, siendo éstos los más adecuados. En general, se ha observado una disminución de propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad que se repasarán a continuación en los siguientes apartados.

2.4.1. Propiedades del hormigón reciclado en estado fresco

La absorción de los áridos reciclados es mayor que la de los áridos naturales. Como consecuencia de dicha absorción, durante el amasado, una cierta cantidad de agua será retenida por los áridos, produciendo un aumento de consistencia y una reducción de la relación agua/cemento que se traduce en una disminución de la trabajabilidad.

Para lograr la consistencia deseada en el hormigón reciclado se debe optar por una de las siguientes soluciones:

- ✓ *Cuantificar el agua adicional que se debe añadir a hormigón durante el amasado mediante ensayos previos;*
- ✓ *Utilizar árido saturado descontando este incremento de la relación w/c;*
- ✓ *Añadir superplastificantes al hormigón.*

Para la aplicación en hormigones autocompactantes el procedimiento último, ajustándolo mediante ensayos previos, puede ser una solución óptima.

2.4.2. Propiedades físico-mecánicas del hormigón reciclado

En los siguientes apartados relativos a las propiedades físico-mecánicas, el método de fabricación del hormigón reciclado incide de manera fundamental. La incorporación de AR seco incide de manera sustancial en la relación agua/cemento efectiva. Existen varios estudios que corroboran esta mejora en las prestaciones, mientras que la presaturación de los áridos mejora la trabajabilidad, pero incide de manera contraria en las prestaciones mecánicas al aumentar la relación w/c.

A continuación, en la Tabla 10 y Tabla 11, se muestra un resumen de los principales autores por años donde se indican las principales características reflejadas en los estudios citados. Se subdivide en dos tablas por años, hasta el 2012 y desde el 2013 a la actualidad.

Para mejor entendimiento de las tablas siguientes se adjunta la leyenda de los encabezados:

Leyenda: **Tamaño G-F:** Grueso o fino. **H-M:** Árido hormigón o mixto. **D:** Durabilidad. **PI:** Prueba industrial. **Itz:** Interfase. **f_c:** Resistencia compresión. **f_{ct}:** Resistencia a tracción **f_{flex}:** Resistencia a flexión **E:** Modulo elasticidad **Fly ash:** Cenizas volantes. **P:** Propiedades físicas (densidad, Absorción). **Ab:** Resistencia abrasión. **H:** Hielo deshielo. **R:** Retracción. **HS:** Humo sílice **SP:** Superplastificante. **F:** Refuerzo fibras acero. **M:** Reciclados mármol. **P:** Permeabilidad. **w/c:** Relación agua/cemento predominante en el estudio (**V:** Varias a/c).

Tabla 10 Relación de estudios de hormigones con AR relacionados con las propiedades mecánicas.

		Relación autores estudios propiedades mecánicas												
AÑO	AUTOR	Árido		Tamaño		Propiedades								
		H-M	G-F	P	W	f _c	f _{ct}	f _{flex}	E	PI	D	w/c		
1973	Buck ⁸²	H	x-x	x	x	x	x						x	V
1987	Ravindrarajha and Tam ⁸³	H	x		x	x	x	x	x	x			x	V
1988	Hansen T.C. ⁸⁴	H	x	x	x	x	x		x					V
1988	Kakizaki, M. et al. ⁸⁵	H	x			x	x		x				x	V
1988	Nishbayashi K. I. et al. ⁸⁶	H	x			x	x		x					V
1988	Ikeda, T. ⁸⁷	H	x			x	x							V
1996	Barra, M. ⁸⁸	H-M	x	x		x							x	V
1999	Dhir, R. et al. ⁸⁹	H	x-x	x	x	x								V
2000	Linbachiya, M.C. et al. ⁹⁰	H	x			x	x		x				x	0,6
2001	Sagoe-Crentsil, K.K. et al. ⁹¹	H	x		x	x	x		x					,6-,7
2002	Ajdukiewicz, A. et al. ⁹²	H	x		x	x	x							0,36
2002	Olorunsogo, F. et al. ⁹³	H	x										x	V

⁸² Buck, A. (1973). "Recycled concrete." Highway Research Record **430**: 1-8.

⁸³ Ravindrarajha, R. and Tam, c. (1987). "Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate." Magazine of Concrete Research **37**(130): 29-38.

⁸⁴ Hansen, T. C. and Marga, M. (1988). Strength of recycled concrete made from coarse and fine recycled concrete aggregate. Demolition and reuse concrete and masonry. Proceeding of the second International RILEM symposium, Kasai, Y.

⁸⁵ Kakizaki, M., Harada, M., Soshiroda, T., Kubota, S., Ikeda, T. and Kasai, Y. (1988). Strength and elastic Modulus of Recycled Aggregate Concrete and Masonry., Demolition And Reuse of demolition Waste. RILEM Symposium on demolition and Reuse of concrete Masonry. JAPAN. **2**: 623-632.

⁸⁶ Nishbayashi, S. and Yamura, K. (1988). Mechanical properties and durability of concrete from recycled coarse Aggregate prepared by crushing concrete second International Symposium of demolition Waste, Japon.

⁸⁷ Ikeda, T., Yamame, S. and Sakamoto, A. (1988). Strengths of concrete containing Recycled concrete aggregate Demolition and Reuse of Concrete Masonry Japan: 858-594.

⁸⁸ Barra, M. (1996). Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón estructural. Departamento de construcciones. , Universidad Politécnica Cataluña.

⁸⁹ Dhir, R. K., Limbachiya, M. C. and Leelawat, T. (1999). "Suitability of recycled concrete aggregate for use in BS 5328 designated mixes." Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings **134**(3): 257-274.

⁹⁰ Limbachiya, M. C., Leelawat, T. and Dhir, R. K. (2000). "Use of Recycled concrete Aggregates in High-strength concrete " Materials and Structures **33**: 574-580.

⁹¹ Sagoe-Crentsil, K. K., Brown, T. and Taylor, A. H. (2001). "Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate." Cement and Concrete Research **31**(5): 707-712.

⁹² Ajdukiewicz, A. and Kliszczewicz, A. (2002). "Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC." Cement & Concrete Composites **24**(2): 269-279.

Relación autores estudios propiedades mecánicas													
AÑO	AUTOR	Árido		Tamaño		Propiedades							
		H-M	G-F	P	W	f_c	f_{ct}	f_{flex}	E	PI	D	w/c	
2002	Gomez-Soberon J.M. ⁹⁴	H	x									x	V
2003	Katz, A. ⁹⁵	H	x-x		x	x	x		x			x	V
2003	Zaharieva, R. et al. ⁹⁶	H	x-x	x	x	x						x	V
2004	Topcu-IK and Sengel ⁹⁷	H	x	x	x	x		x					0,6
2005	Xiao ,J.Z. et al. ⁹⁸	H	x		x	x			x				V
2005	González and Martínez ⁹⁹	H	x		x	x	x		x				V
2005	Khatib, J.M. ¹⁰⁰	H	x-x			x	x		x				V
2006	Sánchez and Alaejos ¹⁰¹	H	x			x	x						V
2007	Etxeberria, M. et al. ¹⁰²	H	x			x	x			x			V
2007	Rahal, K. ¹⁰³	H	x		x	x			x				,4,.6
2007	Noritaka, M. et al. ¹⁰⁴	H	x								x		V
2008	Molina, O. et al. ¹⁰⁵	H	x			x						x	V
2009	Domingo, A. et al. ¹⁰⁶	H	x		x	x							0,5
2009	Corinaldesi and Moriconi ¹⁰⁷	H	x-x		x	x			x				V
2009	Padmini, A. et al. ¹⁰⁸	H	x	x		x			x				,3-.5

⁹³ Olorunsogo, F. T. and Padayachee, N. (2002). "Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes." *Cement and Concrete Research* **32**(2): 179-185.

⁹⁴ Gómez-Soberón, J. M. (2002). "Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate, an experimental study." *Cement & Concrete Research* **32**: 1301-1311.

⁹⁵ Katz, A. (2003). "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete." *Cement and Concrete Research* **33**(5): 703-711.

⁹⁶ Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F. and Wirquin, E. (2004). "Frost resistance of recycled aggregate concrete." *Ibid.* **34**(10): 1927-1932.

⁹⁷ Topcu-IK and Sengel, S. (2004). "Properties of concretes produced with waste concrete aggregate." *cement & Concrete Research* **34**: 1307-1312.

⁹⁸ Xiao, J. Z., Li, J. B. and Zhang, C. (2005). "Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading." *Cement and Concrete Research* **35**(6): 1187-1194.

⁹⁹ González Fonteboa, B. and Martínez, F. (2005). "Hormigones con áridos reciclados: Estudio de las propiedades de los Áridos y de las Mezclas." *Materiales de Construcción*.

¹⁰⁰ Khatib, J. M. (2005). "Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate." *Cement and Concrete Research* **35**(4): 763-769.

¹⁰¹ Sánchez, M. and Alaejos, P. (2009). "Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate." *Construcción and Building Material* **23**: 872-877.

¹⁰² Etxeberria, M., Vazquez, E., Mari, A. and Barra, M. (2007). "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete." *Cement & Concrete Composites* **Nº 5**(Vol 37): 735-742.

¹⁰³ Rahal, K. (2007). "Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate." *Building and Environment* **42**: 407-416.

¹⁰⁴ Noritaka, M., Tomoyuki, S. and Kunio, Y. (2007). "Bond spitting strength of High quality recycled coarse aggregate concrete beams." *Journal of Asian Architecture and Building Engineering* **6**: 331-337.

¹⁰⁵ Molina, O. I., Moragues, A. and Galvez, J. C. (2008). "La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento portland en la durabilidad del hormigon: propiedades fisicas, difusión ion cloruro y del CO2." *Anales de la mecánica de la fractura* **25**: 25-31, *ibid.*

¹⁰⁶ Domingo, A., Lázaro, C., Gayarre, F. and Serrano, M. (2009). "Long term deformations by creep and shrinkage in recycled aggregate concrete." *Materiales and Structures* **47**(8): 1147-1160.

¹⁰⁷ Corinaldesi, V. (2010). "Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates." *Construcción and Building Material* **51**: 1120-1130.

¹⁰⁸ Padmini, A., Ramamurthy, T. and Mathews, M. S. (2009). "Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete." *construcción and Building Material* **23**: 829-832.

Relación autores estudios propiedades mecánicas													
AÑO	AUTOR	Árido		Tamaño		Propiedades							
		H-M	G-F	P	W	f _c	f _{ct}	f _{flex}	E	PI	D	w/c	
2009	Sami, W. et al. ¹⁰⁹	H	x			x	x						V
2009	Thomas, C. et al. ¹¹⁰	H	x			x	x						V
2010	Evangelista L. and de Brito ¹¹¹	H	x-x	x	x	x	x		x		x		V
2010	Corinaldesi, V. ¹¹²	H	x			x			x		R		V
2011	Kou, S-C. et al. ¹¹³	H	x	x		x							,5-,6
2011	Zega and MaioDI ¹¹⁴	H	x	x	x	x	x		x				V
2012	Xiao, J.Z. et al. ¹¹⁵	H	x			x					x		V
2012	Kou and Poon ¹¹⁶	H	x	x		x					x		0,5
2012	Perez-Benedicto, J.A ¹¹⁷	H	x	x	x	x	x		x	x			0,4
2012	Limbachiya, M. et al. ¹¹⁸	H	x	x	x	x					x		,3-.6
2012	Kou, S. et al. ¹¹⁹	H	x	x		x			x		x		0,55

Leyenda: **Tamaño G-F:** Grueso o fino. **H-M:** Árido hormigón o mixto. **D:** Durabilidad. **PI:** Prueba industrial. **Itz:** Interfase. **f_c:** Resistencia compresión. **f_{ct}:** Resistencia a tracción **f_{flex}:** Resistencia a flexión **E:** Modulo elasticidad **Fly ash:** Cenizas volantes. **P:** Propiedades físicas (densidad, Absorción). **Ab:** Resistencia abrasión. **H:** Hielo deshielo. **R:** Retracción. **HS:** Humo sílice **SP:** Superplastificante. **F:** Refuerzo fibras acero. **M:** Reciclados mármol. **P:** Permeabilidad. **w/c:** Relación agua/cemento predominante en el estudio (**V:** Varias w/c).

¹⁰⁹ Sami W, Tabsh, Akmal S and Abdelfatah (2009). "Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete." *Construccion and Building Material* **23**: 1163-1167.

¹¹⁰ Thomas, C., Carrascal, C., Setién, J. and Polanco, J. A. (2009). "Determinacion limite de fatiga en hormigones reciclados de aplicacion estructural." *Anales de la mecanica de la fractura* **26**: 283-288.

¹¹¹ Evangelista, L. and de Brito, J. (2010). "Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates." *Cement & Concrete Composites* **32**(1): 9-14.

¹¹² Corinaldesi, V. (2010). "Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates." *Construccion and Building Material* **51**: 1120-1130.

¹¹³ Kou, S. C., Poon, C. S. and Etxeberria, M. (2011). "Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and poro size distribution of concrete." *Cement & Concrete Composites* **33**: 286-291.

¹¹⁴ Zega, D. and Maio, I. (2011). "Recycled Concretes Made with Waste Ready-Mix Concrete as Coarse Aggregate." *Journal and materials in civil engineering* **23**(3): 281-286.

¹¹⁵ Xiao, J. Z., Lei, B. and Zhang, C. (2012). "On carbonation behavior of recycled aggregate concrete." *Science China Technological Sciences* **55**(9): 2609-2616.

¹¹⁶ Kou, S. C. and Poon, C. S. (2012). "Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate." *Construccion and Building Material* **35**: 69-76.

¹¹⁷ Perez-Benedicto J.A., Del Rio-Merino M., Peralta-Canudo J.L. and Mata, R.-L. (2012). "Características mecánicas de hormigones con áridos reciclados procedentes de rechazos en prefabricación." *Materiales de Construccion* **62**(305): 25-37.

¹¹⁸ Limbachiya, M., Meddah, M. S. and Ouchagour, Y. (2012). "Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete." *Construction and Building Materials* **27**(1): 439-449.

¹¹⁹ Kou, S. C. and Poon, C. S. (2012). "Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate." *Construccion and Building Material* **35**: 69-76.

Tabla 11 Continuación tabla estudios recientes propiedades mecánicas.

		Relación autores estudios propiedades mecánicas										
AÑO	AUTOR	Árido Tamaño				Propiedades mecánicas						
		H-M	G-F	P	W	f _c	f _{ct}	f _{flex}	E	PI	D	w/c
2013	Etxeberria, M. et al. ¹²⁰	H	F	x		x						0,58
2013	Thomas, C. et al. ¹²¹	H	x	x		x	x		x		x	5-,6
2013	Barbudo, A. et al. ¹²²	H	x	x	x	x	x		x		x	0,57
2013	Guedes, M. et al. ¹²³	H	x			x						itz
2013	Rodrigues, F. et al. ¹²⁴	H	F	x							x	0,5
2013	Wang,W. et al. (fly-ash) ¹²⁵	H	x	x		x		x	x		x	,3-,5
2013	Chenn, S. et al. ¹²⁶	H	x			x	x					V
2014	Beltrán, M.G. et al. ¹²⁷	H	x	x	x	x	x				x	,6-,7
2014	Soares, J. et al. ¹²⁸	H	x	x		x	x		x		x	,4-,6
2014	Sidorova,A. et al. ¹²⁹	H	x	x							itz	0,5
2014	Garcia-Lodeiro, I. et al. ¹³⁰	H	x	x							x	,3-,4
2014	Jiménez, C. et al. ¹³¹	H	x	x	x	x					x	,4-,6
2014	Gaedicke, C. et al. ¹³²	H	x	x								V
2014	Faleschini, F. et al. ¹³³	H	x	x	x						x	,4-,5
2014	González and Etxeberria ¹³⁴	H	x	x	x	x	x		x		x	0,28

¹²⁰ Etxeberria, M., Ainchil, J., Pérez, M. E. and Alain, G. (2013). "Use of recycled fine aggregates for Control Low Strength Materials (CLSMs) production." *Ibid.* N° 44: 142-148, *ibid.*

¹²¹ Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A. and Alaejos, P. *Ibid.*"Durability of recycled aggregate concrete." 40: 1054-1065.

¹²² Barbudo, A., de Brito, J., Evangelista, L., Bravo, M. and Agrela, F. (2013). "Influence of water-reducing admixtures on the mechanical performance of recycled concrete." *Journal of Cleaner Production* 59: 93-98.

¹²³ Guedes, M., Evangelista, L., de Brito, J. and Ferro, A. C. (2013). "Microstructural Characterization of Concrete Prepared with Recycled Aggregates." *Microscopy and Microanalysis* 19(5): 1222-1230.

¹²⁴ Rodrigues, F., Evangelista, L. and de Brito, J. (2013). "A New Method to Determine the Density and Water Absorption of Fine Recycled Aggregates." *Materials Research-Ibero-American Journal of Materials* 16(5): 1045-1051.

¹²⁵ Wang, W.-I., Kou, S.-c. and Xing, F. (2013). "Deformation properties and direct shear of medium strength concrete prepared with 100% recycled coarse aggregates." *Construction and Building Materials* 48: 187-193.

¹²⁶ Chen, S.-H., Wang, H.-Y. and Zhou, J.-W. *Ibid.*"Investigating the properties of lightweight concrete containing high contents of recycled green building materials." 98-103.

¹²⁷ Beltrán, M. G., Agrela, F., Barbudo, A., Ayuso, J. and Ramírez, A. (2014). "Mechanical and durability properties of concretes manufactured with biomass bottom ash and recycled coarse aggregates." *Construction and Building Material* 72: 231-238.

¹²⁸ Soares, D., Brito, J., Ferreira, J. and Pacheco, J. *Ibid.*"Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance." 71: 263-272.

¹²⁹ Sidorova, A., Vacquez-Ramonic, E. and Barra-Bicinotto, M. *Ibid.*"Study of recycled aggregates nature's influence on the aggregate-cement paste interphase and ITZ." 68: 677-684.

¹³⁰ Garcia-Lodeiro, I., Palomo, J. G., Palomo, A. and Fernandez Jimenez, A. (2014). "A statistical approach to the study of concrete carbonation." *Materiales de Construcción* 64(313).

¹³¹ Jimenez, C., Barra, M., Valls, S., Aponte, D. and Vazquez, E. (2014). "Durability of recycled aggregate concrete designed with the Equivalent Mortar Volume (EMV) method: Validation under the Spanish context and its adaptation to Bolomey methodology." *Materiales de Construcción* 64(313).

¹³² Gaedicke, C., Marines, A. and Miankodila, F. (2014). "Assessing the abrasion resistance of cores in virgin and recycled aggregate pervious concrete." *Construction and Building Material* 68: 701-708.

¹³³ Faleschini, F., Jiménez, C., Barra, M., Aponte, D., Vázquez, E. and Pellegrino, C. (2014). "Rheology of fresh concretes with recycled aggregates." *Construction and Building Material* 73: 417-424.

¹³⁴ González, A. and Etxeberria, M. (2014). "Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete." *Construction and Building Materials* 52: 227-235.

Relación autores estudios propiedades mecánicas												
AÑO	AUTOR	Árido Tamaño				Propiedades mecánicas						
		H-M	G-F	P	W	f _c	f _{ct}	f _{flex}	E	PI	D	w/c
2014	Saravanakumar, P. et al. ¹³⁵	H			x	x	x				x	V
2014	Kanellopoulos, A. et al. ¹³⁶	H	x	x	x						x	0,5
2014	Yoda and Shintani ¹³⁷	H	x-x	x	x	x				x	x	,4-5
2014	Sun, G. et al. ¹³⁸	H	x									V
2014	Duan and Poon ¹³⁹	H	x	x		x	x		x		x	,3-,7
2014	Matías, D. et al. ¹⁴⁰	H	x	x	x	x				sp	x	0,5
2014	Thomas, C. et al. ¹⁴¹	H	G			x	x		x			V
2014	González-Corominas A. ¹⁴²	H-M	x-x	x		x	x	x	x		x	V
2014	Salleham, I. ¹⁴³	H	x	x		x		x	x	itz		0,41
2014	Shin, M. et al. ¹⁴⁴	H	x	x		x	x		x		x	V
2015	Bravo, M. et al. ¹⁴⁵	H	x	x	x	x	x		x			V
2015	Xiao, J. et al. ¹⁴⁶	H	x			x						V
2015	Xiao, J. et al. ¹⁴⁷	H	x							x		V
2016	González-Taboada et al. ¹⁴⁸	H	x			x	x	x	x			V
2016	Xuan, D. et al. ¹⁴⁹	H	x			x	x				x	V
2016	Silva, R. et al. ¹⁵⁰	H	x			x	x					V

¹³⁵ Saravanakumar, P. and Dhinakaran, G. (2013). "Durability characteristics of recycled aggregate concrete." *Structural Engineering and Mechanics* **47**(5): 701-711.

¹³⁶ Kanellopoulos, A., Nicolaidis, D. and Petrou, M. F. (2014). "Mechanical and durability properties of concretes containing recycled lime powder and recycled aggregates." *Construction and Building Materials* **53**: 253-259.

¹³⁷ Yoda, K. and Shintani, A. Ibid. "Building application of recycled aggregate concrete for upper-ground structural elements." **67**(PART C): 379-385.

¹³⁸ Sun, L., Ge, D., Ren, F., Liang, R., Wang, Z. and Hao, H. (2014). "Recycled aggregate concrete by using waste concrete as aggregate in construction working place." *Beijing Jiaotong Daxue Xuebao/Journal of Beijing Jiaotong University* **38**(1): 20-23+28.

¹³⁹ Duan, Z. H. and Poon, C. S. (2014). "Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars." *Materials and Design* **58**: 19-29.

¹⁴⁰ Matias, D., Brito, J. and Rosa, A. (ASCE 2014). *Durability of Concrete with Recycled Coarse Aggregates: Influence of Superplasticizers*, American Society of civil Engineers.

¹⁴¹ Thomas, C., Sosa, I., Setien, J., Polanco, J. A. and Cimentada, A. I. (2014). "Evaluation of the fatigue behavior of recycled aggregate concrete." *Journal of Cleaner Production* **65**: 397-405.

¹⁴² Gonzalez-Corominas and Etxeberria, M. (2014). "Properties of high performance concrete made with recycled fine ceramic and coarse mixed aggregates." *Construction and Building Material* **68**: 618-626.

¹⁴³ Salleham, I. and Mahyuddin, R. (2014). "Mechanical strength and drying shrinkage properties of concrete containing treated coarse recycled concrete aggregates." *Materiales and Structures* **68**: 726-739.

¹⁴⁴ Shin, M., Kim, K., Gwon, S. W. and Cha, S. (2014). "Durability of sustainable sulfur concrete with fly ash and recycled aggregate against chemical and weathering environments." *Construction and Building Materials* **69**: 167-176.

¹⁴⁵ Bravo, M., De Brito, J., Pontes, J. and Evangelista, L. (2015). "Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants." *Journal of Cleaner Production* **99**: 59-74.

¹⁴⁶ Xiao, J., Li, L., Shen, L. and Poon, C. S. (2015). "Compressive behaviour of recycled aggregate concrete under impact loading." *Cement and Concrete Research* **71**: 46-55.

¹⁴⁷ Xiao, J., Sun, C. and Jiang, X. (2015). "Flexural behaviour of recycled aggregate concrete graded slabs." *Structural Concrete* **16**(2): 249-261.

¹⁴⁸ González-Taboada, I., González-Fontoboa, B., Martínez-Abella, F. and Pérez-Ordóñez, J. L. (2016). "Prediction of the mechanical properties of structural recycled concrete using multivariable regression and genetic programming." *Construction and Building Materials* **106**: 480-499.

¹⁴⁹ Xuan, D., Zhan, B. and Poon, C. S. (2016). "Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates." *Cement and concrete composites* **65**: 67-74.

Relación autores estudios propiedades mecánicas													
AÑO	AUTOR	Árido Tamaño				Propiedades mecánicas							
		H-M	G-F	P	W	f _c	f _{ct}	f _{flex}	E	PI	D	w/c	
2016	Yazdanbakhsh, A. et al ¹⁵¹	H	G			x	x		x				V

Leyenda: **Tamaño G-F:** Grueso o fino. **H-M:** Árido hormigón o mixto. **D:** Durabilidad. **PI:** Prueba industrial. **Itz:** Interfase. **f_c:** Resistencia compresión. **f_{ct}:** Resistencia a tracción **f_{flex}:** Resistencia a flexión **E:** Modulo elasticidad **Fly ash:** Cenizas volantes. **P:** Propiedades físicas (densidad, Absorción). **Ab:** Resistencia abrasión. **H:** Hielo deshielo. **R:** Retracción. **HS:** Humo sílice **SP:** Superplastificante. **F:** Refuerzo fibras acero. **M:** Reciclados mármol. **P:** Permeabilidad. **w/c:** Relación agua-cemento predominante en el estudio (**V:** Varias a/c).

2.4.2.1. Resistencia a compresión

Existen numerosísimos estudios donde se comprueba que la resistencia a compresión de los hormigones reciclados disminuye respecto a los convencionales a medida que aumenta el porcentaje de AR presente en la mezcla.

La evidencia demuestra que por un lado el mortero adherido posee una resistencia menor que el árido natural, además, la nueva pasta y árido sobre la unión con el antiguo suma zonas débiles en dicha superficie de contacto que afectan sobremedida.

La sustitución del árido se puede llevar a cabo reemplazando el árido fino, estudiado por Hansen¹⁵², o el árido grueso. Estudios donde la sustitución de un 30% del árido fino resultan reducciones del 0,5-1% respecto al hormigón de control, y que para un 100% disminuyen hasta un 7%¹⁵³.

Estudios recientes han experimentado elaborando hormigones con porcentajes en el que el 51% estaban constituidos por azulejos, tejas y ladrillos. Los resultados de su capacidad a compresión fueron de un 13% para un 20% un 22,9% para sustitución del 50% y de un 36%, de un 100%, respecto del hormigón de control¹⁵⁴. La influencia del porcentaje de sustitución del árido reciclado en la resistencia del hormigón es destacable.

¹⁵⁰ Silva, R. V., De Brito, J., Evangelista, L. and Dhir, R. K. (2016). "Design of reinforced recycled aggregate concrete elements in conformity with Eurocode 2." *Construction and Building Materials* **105**: 144-156.

¹⁵¹ Yazdanbakhsh, A. and Bank, L. C. Ibid. "The effect of shear strength on load capacity of FRP strengthened beams with recycled concrete aggregate." **102**: 133-140.

¹⁵² Hansen, T. C. and Marga, M. (1988). Strength of recycled concrete made from coarse and fine recycled concrete aggregate. Demolition and reuse concrete and masonry. Proceeding of the second International RILEM symposium, Kasai, Y.

¹⁵³ Evangelista, L. and de Brito, J. (2014). "Concrete with fine recycled aggregates: a review." *European Journal of Environmental and Civil Engineering* **18**(2): 129-172.

¹⁵⁴ Pinto-Varela, E. (2012). Evaluación de la sostenibilidad ambiental de hormigones con áridos reciclados de residuos de construcción y demolición. Tesis. Barcelona, Universidad Politécnica Cataluña, *ibid*.

Diversos autores fijan porcentajes de disminución de las resistencia cuyo rango de valores supone entre un 0-5% para una sustitución de un 20%, 5-15% para una sustitución de 50% y hasta un 30% para la incorporación de total de AR,(Sánchez de Juan¹⁵⁵, Jiménez Montoya¹⁵⁶, López-Gayarre¹⁵⁷, González Fuenteboa¹⁵⁸).

Se estima que dicha reducción es debida a la menor resistencia de los áridos y al aumento de zonas débiles en el hormigón, ya que además de la unión pasta-árido que presenta el árido reciclado, aparece otra zona de contacto entre la pasta del árido reciclado y la pasta nueva.

La sustitución del 20% de AR es perfectamente asumible, incluso para porcentajes superiores al 50%. Si se mantiene constante la proporción agua/cemento y se compensa la menor trabajabilidad mediante el uso de superplastificantes se consiguen resistencias análogas a las del hormigón convencional.

Los porcentajes elevados de sustitución de árido natural por árido reciclado introducen en la mezcla una elevada absorción y como consecuencia una relación agua/cemento efectiva inferior. Si resulta admisible la disminución de fluidez en el hormigón se podrán conseguir hormigones de mayor resistencia. Esto relaciona la influencia de la relación agua/cemento efectiva, por ello algunos estudios han encontrado que la utilización de hormigones con áridos reciclados mejora las prestaciones, además de obtener un ajuste de tipo exponencial para la representación de las resistencias en función de su relación agua/cemento efectiva¹⁵⁹.

Es muy importante **evaluar la calidad de los áridos reciclados** puesto que influyen de forma directa sobre la resistencia a compresión del hormigón. Esta circunstancia es particularmente importante cuando se deseen resistencias superiores a 30 MPa y el origen del AR pertenezca a hormigones de baja resistencia.

¹⁵⁵ Sánchez, M. (2004). Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. Tesis. Departamento de Ingeniería Civil. Madrid, ETS Caminos Madrid: 474, *ibid*.

¹⁵⁶ Jiménez Montoya (2009). Hormigón Armado. Madrid.

¹⁵⁷ López-Gayarre, F. (2008). Influencia en la variación de los parámetros de dosificación y fabricación de hormigón reciclado estructural sobre las propiedades físico mecánicas. Departamento de construcción e ingeniería de fabricación, Universidad Oviedo.

¹⁵⁸ González Fontebao, B., Martínez, F., Carro, D. and Eiras, J. (2010). "Shear friction capacity of recycled concretes." *Cortante-fricción de los hormigones reciclados* **60**(299): 53-67.

¹⁵⁹ Thomas, C. (2010). Hormigón reciclado de aplicación estructural: Durabilidad en ambiente marino y comportamiento a fatiga. Ciencia e ingeniería del terreno y los materiales. Santander, Cantabria: 356.

Estudios experimentales con áridos reciclados procedentes de puentes, elementos de obra civil o edificios de hormigón de gran calidad han obtenido resultados superiores al hormigón de control¹⁶⁰.

La calidad de los áridos reciclados procedentes de los residuos de piezas prefabricadas correspondientes a empresas de dicho sector da como resultado hormigones también de gran calidad. Las resistencias correspondientes, incluso con sustituciones de hasta un 100% con este tipo de áridos resultan incluso mayores que las del hormigón de control para una edad de 28 días, porcentaje que se equilibra con edades superiores¹⁶¹.

En estudios recientes¹⁶² con este tipo de áridos optimizando su relación agua/cemento con empleo de aditivos SP obtienen valores semejantes al hormigón de control, además de otras propiedades relacionadas con la durabilidad.

El contenido de mortero adherido influye en la resistencia a compresión. Según un estudio de Nishbayashi¹⁶³ donde se analizaron áridos reciclados de diferentes procedencias y con distintos contenidos de mortero adherido (entre 35,5% y 67,6%), los valores de resistencia que se obtuvieron en los hormigones reciclados fabricados, presentaron variaciones comprendidas entre -15% y -30% respecto al hormigón de control.

También existen experiencias con **hormigón autocompactante** y su empleo con áridos reciclados, en algunos casos incorporando cenizas volantes¹⁶⁴.

El tratamiento de áridos reciclados mediante solución de ácidos (CIH) etc., también permite mejorar sus propiedades mecánicas.

La presencia de impurezas en el árido reciclado provoca un descenso en la resistencia del hormigón, según la naturaleza de las mismas. Las impurezas que afectan mayormente a la resistencia del hormigón son el plástico, yeso, asfalto y madera. También se encuentran partículas de material cerámico. Los hormigones que contenían hasta un 6% de material cerámico no experimentaron disminución de resistencia siempre que la relación w/c se mantuviera en el intervalo 0,45-0,55. En

¹⁶⁰ Sami and Tabsh. (2009). "Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete." *Construcción and Building Material* **23**: 1163-1167.

¹⁶¹ Pérez Benedicto, J. A. (2011). Estudio experimental sobre propiedades mecánicas del hormigón reciclado con áridos procedentes de la no calidad. Departamento de construcciones Madrid, Universidad Politécnica de Madrid.

¹⁶² Soares, D., Brito, J., Ferreira, J. and Pacheco, J. (2014). "Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance." *Construcción and Building Material* **71**: 263-272.

¹⁶³ Nishbayashi, S. and Yamura, K. (1988). Mechanical properties and durability of concrete from recycled coarse Aggregate prepared by crushing concrete second International Symposium of demolition Waste, Japon.

¹⁶⁴ Wang, H.-l., Wang, J.-j., Sun, X.-y. and Jin, W.-l. (2013). "Improving performance of recycled aggregate concrete with superfine pozzolanic powders." *Journal of Central South University* **20**(12): 3715-3722.

cambio para valores de w/c de 0,65 se detectó una caída de la resistencia a compresión de un 10%.

La evolución de la resistencia a compresión en el tiempo de acuerdo con los trabajos de Hansen T.C¹⁶⁵ presenta los aspectos siguientes:

- La ganancia de resistencias a edades menores de 28 días es ligeramente inferior en el hormigón reciclado.
- El aumento de resistencia a edades superiores a los 28 días es mayor en los hormigones reciclados.
- La rotura a compresión según otros estudios llevados a cabo permite apreciar las siguientes causas:
 - Falta de adherencia entre el árido reciclado y el mortero nuevo;
 - Falta de adherencia entre el árido natural y el mortero adherido en el árido reciclado.

2.4.2.2. Resistencia a tracción

De acuerdo con los estudios de Alaejos-Sánchez¹⁶⁶, apoyándose en los estudios de Fuji¹⁶⁷, Katz¹⁶⁸ y Ajdukiewicz¹⁶⁹, los resultados obtenidos presentan una gran dispersión que puede oscilar entre -20% y +20% respecto del hormigón de control a los 28 días.

En determinadas circunstancias los áridos reciclados pueden provocar reducciones hasta del 30%, tales como:

- *Utilización de áridos reciclados procedentes de hormigones de baja resistencia para la fabricación de hormigones reciclados de relación w/c muy baja;*
- *Uso de aireantes en el hormigón reciclado, lo que produce una disminución de resistencias de dicho hormigón.*

¹⁶⁵ Hansen, T. C. and Marga, M. (1988). Strength of recycled concrete made from coarse and fine recycled concrete aggregate. Demolition and reuse concrete and masonry. Proceeding of the second International RILEM symposium, Kasai, Y.

¹⁶⁶ Sánchez, M. and Alaejos, P. (2012). Estudio sobre las propiedades del hormigón fabricado con áridos reciclados. Monografías CEDEX. M. d. Fomento. Madrid. **Monografías:** 220.

¹⁶⁷ Fuji, T. (1988). Strengths and Drying Shrinkage Behavior of Concrete Using Concrete Crushed Aggregate. Demolition and Reuse of Concrete Masonry. P. o. t. s. I. R. S. Y. Kasai. Reuse of Demolition Waste. **32:** 660-669.

¹⁶⁸ Katz, A. (2003). "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete." Cement and Concrete Research **33**(5): 703-711.

¹⁶⁹ Ajdukiewicz, A. and Kliszczewicz, A. (2002). "Influence of Recycles Aggregates on Mechanical properties of HS/HPC." Cement & Concrete Composites **24**(2): 269-279.

La gran dispersión de resultados depende mucho de las condiciones del hormigón de control tales como dosificación, consistencia o resistencia. Los resultados dependen también de la calidad del hormigón original para fabricar el árido reciclado. Al igual que la resistencia a compresión, la influencia de la relación agua/cemento efectiva supone valores de ajuste exponenciales y comparables en función del grado de sustitución y su relación agua/cemento efectiva (Fig. 14).

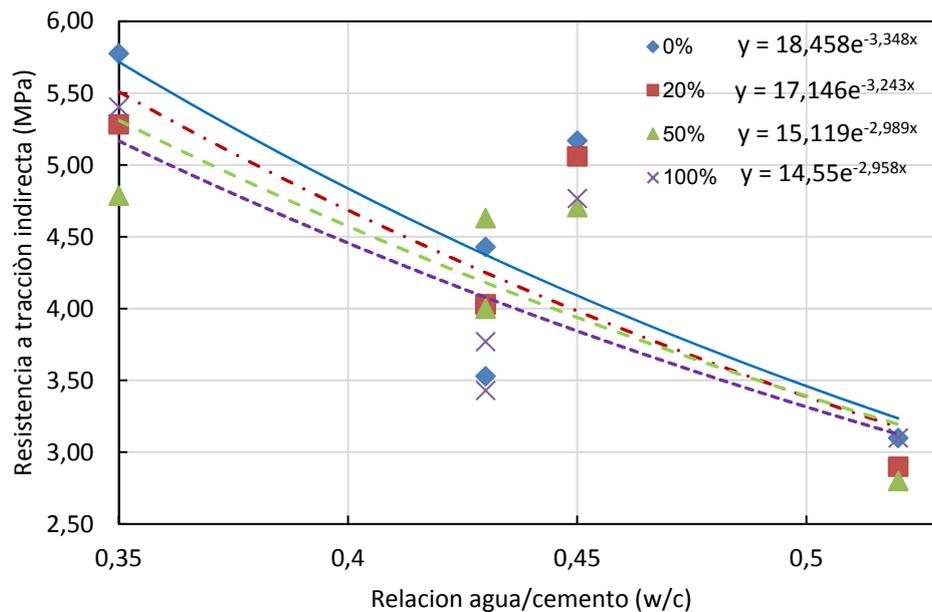


Fig. 14 Comparativo de estudios de tracción indirecta con empleo de áridos reciclados Kikuchi¹⁷⁰, Etxeberria¹⁷¹, Sánchez¹⁷², Soares¹⁷³, Thomas¹⁷⁴.

Según el estudio experimental de Sánchez de Juan¹⁷⁵, se puede concluir, por lo tanto, que la relación que establece la EHE-08 entre la resistencia a compresión y tracción indirecta del hormigón convencional es válida también para hormigones reciclados.

2.4.2.3. Resistencia a flexotracción

Los cambios que se producen en la resistencia a flexotracción del hormigón reciclado son similares a los que se producen en la resistencia a tracción.

¹⁷⁰ Kikuchi, M. Y., A.; (1993). The total evaluation of recycled aggregates and recycled concrete. Demolition and reuse of concrete masonry, proceedings of the third international RILEM symposium Erik K. Lauritzen.

¹⁷¹ Etxeberria, M., Vazquez, E., Mari, A. and Barra, M. (2007). "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete." *Cement & Concrete Composites* Nº 5(Vol 37): 735-742.

¹⁷² Sánchez, M. (2004). Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. Tesis. Departamento de Ingeniería Civil. Madrid, ETS Caminos Madrid: 474.

¹⁷³ Soares, D., Brito, J., Ferreira, J. and Pacheco, J. (2014). "Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance." *Construction and Building Material* 71: 263-272.

¹⁷⁴ Thomas, C. (2010). Hormigón reciclado de aplicación estructural: Durabilidad en ambiente marino y comportamiento a fatiga. Ciencia e ingeniería del terreno y los materiales. Santander, Cantabria: 356.

¹⁷⁵ Sánchez, M. and Alaejos, P. (2012). Estudio sobre las propiedades del hormigón fabricado con áridos reciclados. Monografías CEDEX. M. d. Fomento. Madrid. **Monografías**: 220.

2.4.2.4. Módulo de elasticidad

Dosificar con árido reciclado provoca una disminución del módulo de elasticidad debido fundamentalmente a la pasta de cemento adherida que contiene dicho árido. El módulo de elasticidad de la pasta de cemento, de acuerdo con la experimentación, es inferior a la del hormigón y a la del árido natural (Tabla 12 ¹⁷⁶).

Tabla 12 Cuadro comparativo del módulo de elasticidad de los componentes del hormigón.

Resistencia a compresión (MPa)	E_c del Árido (GPa)	E_c del Hormigón (GPa)	E_c de la pasta de cemento (GPa)
20	73	28	17,5
25	73	33	17,5
30	73	39	17,5

Del examen de dicho cuadro se deduce que el módulo de elasticidad de la pasta de cemento es del orden del 50% del E_c del hormigón, concretamente para una resistencia a compresión de 25 MPa es el 53%.

De acuerdo con lo expuesto por Jiménez Montoya¹⁷⁷ el módulo de deformación longitudinal para sustituciones de árido reciclado por encima del 20%, disminuye progresivamente al aumentar el porcentaje de AR, pudiendo llegar a ser el 60% del correspondiente a hormigón convencional en el caso límite en que la sustitución del árido alcanza el 100%. No obstante debido a la gran variabilidad en la calidad de los áridos reciclados, se puede producir una gran dispersión en el valor del módulo, lo que aconseja realizar ensayos en cada caso.

La disminución del módulo de elasticidad se debe a los siguientes factores:

- *Menor módulo de elasticidad del árido reciclado porque la pasta que lo envuelve tiene un módulo inferior, al del árido natural y al del hormigón;*
- *La textura superficial rugosa del árido reciclado y las pequeñas fisuras que puede presentar el mortero adherido, disminuyen también el módulo de elasticidad del hormigón análogamente a lo que sucede con los hormigones fabricados con árido ligero.*

Las recomendaciones de Rilem para la utilización de árido reciclado procedente de hormigón (Tipo II) establecen un coeficiente de corrección de 0,8 para el módulo de elasticidad del hormigón reciclado. Para el árido Tipo III (compuesto por al menos

¹⁷⁶ Ibid. ibid.

¹⁷⁷ Jiménez Montoya (2009). Hormigón Armado. Madrid, ibid.

un 80% de árido natural y un 20% de árido reciclado), el módulo de elasticidad que se considera que es el mismo que para el hormigón de control.

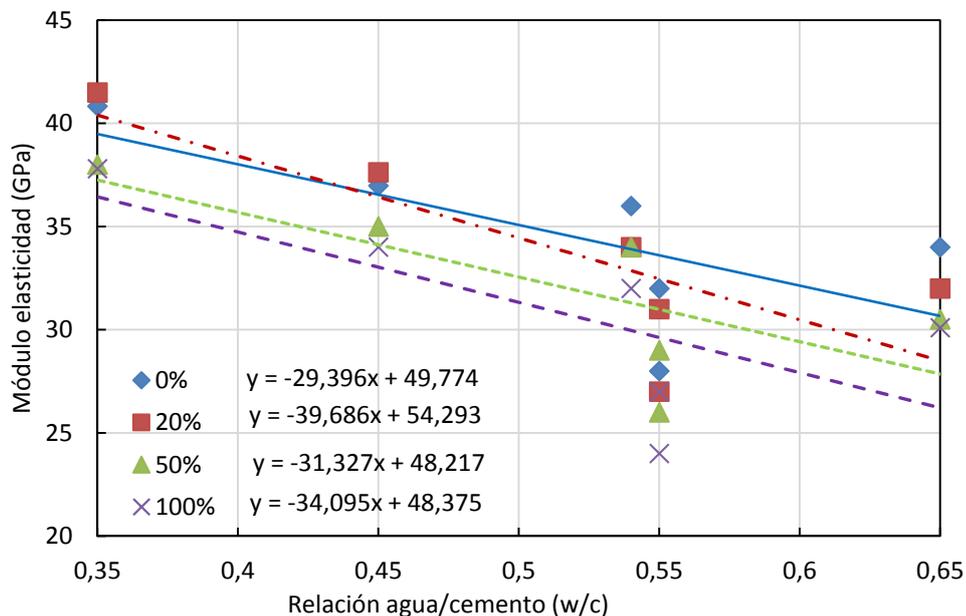


Fig. 15 Líneas de tendencia de los resultados obtenidos por varios autores, Soares¹⁷⁸, Etxeberria¹⁷⁹, Kou¹⁸⁰ y Thomas¹⁸¹, para diferentes relaciones agua/cemento (w/c).

La presencia de impurezas en el árido reciclado provoca una disminución del módulo del hormigón reciclado y lo hace en mayor medida que la resistencia a compresión. Contenidos de hasta un 6% de algunas impurezas pueden ser frecuentes en el árido reciclado si no se realiza un control adecuado del material de origen¹⁸². Según diversos estudios la línea de tendencia óptima para la representación de valores de módulo de elasticidad en función de la relación agua/cemento es de tipo lineal¹⁸³.

2.4.2.5. Microestructura del hormigón con áridos reciclados

La calidad de la interfase entre árido reciclado y el nuevo árido, tiene gran influencia en el comportamiento mecánico de los hormigones. Los procedimientos de trituración, ya sea por impacto o por mandíbulas, hace que la capa superficial de AR

¹⁷⁸ Soares, D., Brito, J., Ferreira, J. and Pacheco, J. (2014). "Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance." *Construction and Building Material* **71**: 263-272.

¹⁷⁹ Etxeberria, M., Vazquez, E., Mari, A. and Barra, M. (2007). "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete." *Cement & Concrete Composites* **Nº 5**(Vol 37): 735-742.

¹⁸⁰ Kou, S. C., Poon, J. and Agrela, F. (2011). "Comparisons of natural and recycled aggregate concrete prepared with de addition of differente minerale admixtures." *Cement and concrete composites* **33**(8): 788-795.

¹⁸¹ Thomas, C. (2010). *Hormigón reciclado de aplicación estructural: Durabilidad en ambiente marino y comportamiento a fatiga*. Ciencia e ingeniería del terreno y los materiales. Santander, Cantabria: 356.

¹⁸² Barra, M. (1996). *Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón estructural*. Departamento de construcciones. , Universidad Politécnica Cataluña.

¹⁸³ Thomas, C., Setián, J., Polanco, J. A. and Alaejos, P. (2013). "Durability of recycled aggregate concrete." *Construction and Building Material* **40**: 1054-1065.

sea débil, porosa y frágil. El proceso también deja numerosas microgrietas en los AR. Por lo tanto, en comparación con los áridos naturales, los AR se caracterizan por menor densidad, mayor absorción de agua, y mayor porosidad.

En el hormigón con árido reciclado existen tres zonas de interfase bien diferenciadas¹⁸⁴.

- a) *El mortero antiguo y el mortero nuevo.*
- b) *El mortero antiguo y el árido antiguo.*
- c) *El mortero nuevo con el árido antiguo.*

El árido reciclado sin mortero adherido presenta un comportamiento similar al del árido natural en su interfase.

La antigua zona de transición del mortero antiguo supone una zona débil debido a la presencia de poros y grietas en el AR, con la posibilidad de almacenamiento de agua (Kou¹⁸⁵, González-Fuenteboa¹⁸⁶).

La interfase entre la pasta nueva y el árido reciclado puede promover la formación de un mayor contenido de hidróxido cálcico (Ca(OH)₂, CH o porlantdita). Estos cristales de porlantdita se forman en los poros del mortero antiguo, Kong¹⁸⁷.

En términos de la microestructura de hormigón, la zona de interfase entre el árido agregado y la pasta de cemento es importante porque esta zona gobierna la resistencia mecánica del hormigón. Usando microscopía electrónica de barrido (SEM), Katz¹⁸⁸ encontró que en la superficie del AR, fabricado por una trituradora de mandíbulas, se encuentran cubiertas con partículas sueltas, que pueden debilitar la unión entre el AR y la nueva pasta de cemento, lo que lleva a una disminución en la resistencia mecánica de hormigón.

Dependiendo del proceso de elaboración del hormigón puede presentar las siguientes características:

- ✓ *Se forma una película de agua alrededor de los áridos durante el amasado, resultando una interfase con relación w/c casi el doble que la de*

¹⁸⁴ Poon, C., Shui, Z. and Lam (2004). "Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates." *Ibid.* **18**: 461-468.

¹⁸⁵ Kou, S. C., Poon, J. and Agrela, F. (2011). "Comparisons of natural and recycled aggregate concrete prepared with the addition of different mineral admixtures." *Cement and concrete composites* **33**(8): 788-795.

¹⁸⁶ González Fuenteboa, B. and Abella, M. (2008). "Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume: materials and mechanical properties." *Building and Environment* **43**(4): 429-427.

¹⁸⁷ Kong, D., Ting, L., Jianjun, Z., Chengchang, M., Jun, J. and Jing, J. (2010). "Effect and mechanism of surface-coating pozzolanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete." *Construction and Building Materials* **24**: 701-708.

¹⁸⁸ Katz, A. (2003). "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete." *Cement and Concrete Research* **33**(5): 703-711.

la pasta. A medida que se va hidratando dicha relación se reduce la película de agua por cemento hidratado.

- ✓ Sobre la superficie de los AR se acumula pasta de cemento de menor relación w/c, lo cual permite que se presente una zona de transición más efectiva y fuerte.

2.4.3. Durabilidad del hormigón reciclado

La Tabla 13 y Tabla 14 muestra una relación de estudios reflejando las características fundamentales relacionadas con la durabilidad.

Para mejor entendimiento de las tablas siguientes adjuntamos la leyenda de los encabezados:

Leyenda. **Tamaño G-F:** Grueso o fino **HD:** Hielo deshielo **Per:** Permeabilidad **Por:** Porosidad **PM:** Propiedades mecánicas **PI:** Prueba industrial. **Abs:** Absorción. **Itz:** interfase. **Fly ash:** Cenizas volantes **P:** Propiedades físicas (densidad, Absorción) **HD:** Hielo-deshielo. **Retra:** Retracción. **ITZ:** Interfase **AB:** abrasión resistencia **H:** hielo deshielo **R:** retracción, **HS:** Humo sílice **SP:** Superplastificante **F:** Refuerzo fibras acero **Carb:** Carbonatación **w/c:** Relación agua/cemento (**V:** Varias w/c).

Tabla 13 Relación de resultados obtenidos por autores relativos a la durabilidad en orden cronológico.

Relación de autores y estudios durabilidad												
AÑO	AUTOR	Tamaño	Propiedades									
		G-F	Por	Abs	Per	Carb.	HD	Retra	Itz	PM	w/c	
1973	Buck 1973 ¹⁸⁹	G						x			X	V
1988	Hansen T.C. ¹⁹⁰	G	x	x		x	x				X	V
1996	Barra et al. ¹⁹¹	G					x				X	V
1999	Dhir, R. et al. ¹⁹²	G		x		x	x				x	0,5
2000	Limbachiya, M.C. ¹⁹³	G					x					V
2001	Sagoe, K.K. et al. ¹⁹⁴	G		x		x			x		x	V
2002	Ajdukiewicz, A. ¹⁹⁵	G						x				V

¹⁸⁹ Buck, A. (1973). "Recycled concrete." Highway Research Record **430**: 1-8.

¹⁹⁰ Hansen, T. C. and Marga, M. (1988). Strength of recycled concrete made from coarse and fine recycled concrete aggregate. Demolition and reuse concrete and masonry. Proceeding of the second International RILEM symposium, Kasai, Y.

¹⁹¹ Barra, M. (1996). Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón estructural. Departamento de construcciones. , Universidad Politécnica Cataluña.

¹⁹² Dhir, R. K. and Limbchiya (1999). "Suitable of recycled concrete aggregate for use BS 5328 Designated Mixes." Structures and Building.

¹⁹³ Limbachiya, M. C., Leelawat, T. and Dhir, R. K. (2000). "Use of Recycled concrete Aggregates in High-strength concrete " Materials and Structures **33**: 574-580.

¹⁹⁴ Sagoe-Crentsil, K. K., Brown, T. and Taylor, A. H. (2001). "Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate." Cement and Concrete Research **31**(5): 707-712.

¹⁹⁵ Ajdukiewicz, A. and Kliszczewicz, A. (2002). "Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC." Cement & Concrete Composites **24**(2): 269-279.

Relación de autores y estudios durabilidad											
AÑO	AUTOR	Tamaño		Propiedades							
		G-F	Poros	Abs	Per	Carb.	HD	Retra	Itz	PM	w/c
2002	Olorunsogo, F. et al. ¹⁹⁶	G	x	x	x						V
2002	Gómez, M. ¹⁹⁷	G	x	x							,4,6
2003	Katz, A. ¹⁹⁸	G		x							
2004	Zaharieva, R. et al. ¹⁹⁹	G	x	x	x		x				0,5
2004	Topcu-IK Sengel ²⁰⁰	G					x				
2004	Chindapasirt, P. ²⁰¹	G	flyass					x	sulfat		V
2008	Molina, A. et al. ²⁰²	G	x			x					V
2008	Nehdi, U. et al. ²⁰³	G					x		x	x	V
2009	Domingo A. et al. ²⁰⁴	G-F	x					x		x	0,5
2010	Corinaldesi, V. ²⁰⁶	G				x					V
2009	Loser, R. et al. ²⁰⁷	G						x		x	V
2010	Evangelista, L. ²⁰⁸	G-F		x		x					V
2010	Kong, D. et al. ²⁰⁹	G						x	x		V
2010	Zoran, J. et al. ²¹⁰	G								selfc	
2010	Brito, J. et al. ²¹¹	G	abrasi								V

¹⁹⁶ Olorunsogo, F. T. and Padayachee, N. (2002). "Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes." *Cement and Concrete Research* **32**(2): 179-185.

¹⁹⁷ Gómez-Soberón, J. M. (2002). "Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate, an experimental study." *Cement & Concrete Research* **32**: 1301-1311.

¹⁹⁸ Katz, A. (2003). "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete." *Cement and Concrete Research* **33**(5): 703-711.

¹⁹⁹ Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F. and Wirquin, E. (2004). "Frost resistance of recycled aggregate concrete." *Ibid.* **34**(10): 1927-1932.

²⁰⁰ Topcu-IK and Sengel, S. (2004). "Properties of concretes produced with waste concrete aggregate." *cement & Concrete Research* **34**: 1307-1312.

²⁰¹ Chindapasirt, P., Homwuttivong, S. and 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.

²⁰² Molina, O. I., Moragues, A. and Galvez, J. C. (2008). "La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento portland en la durabilidad del hormigon: propiedades físicas, difusión ion cloruro y del CO₂." *Anales de la mecánica de la fractura* **25**: 25-31.

²⁰³ Nehdi, M. L. and Bassuoni, M. T. (2008). "Durability of self-consolidating concrete to combined effects of sulphate attack and frost action." *Materiales and structures*. **41**: 1657-1679.

²⁰⁴ Domingo-Cabo, A., Lázaro, C., Gayarre, F., Serrano, M., Serna, P. and Castaño-Tabares (2009). "Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete." *Construcción and Building Material* **23**: 2545-2553.

²⁰⁵ Domingo, A., Lázaro, C., Gayarre, F. and Serrano, M. (2009). "Long term deformations by creep and shrinkage in recycled aggregate concrete." *Materiales and Structures* **47**(8): 1147-1160.

²⁰⁶ Corinaldesi, V. (2010). "Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates." *Construcción and Building Material* **51**: 1120-1130.

²⁰⁷ Loser, R. and Leeman, A. (2009). "Shrinkage and restrained shrinkage cracking of self-compacting concrete compared to conventionally vibrated concrete." *Materiales and Structures* **42**: 71-82.

²⁰⁸ Evangelista, L. and de Brito, J. (2010). "Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates." *Cement & Concrete Composites* **32**(1): 9-14.

²⁰⁹ Kong, D., Ting, L., Jianjun, Z., Chengchang, M., Jun, J. and Jing, J. (2010). "Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete." *Construcción and Building Material* **24**: 701-708.

²¹⁰ Zoran, J. G., Gordana, A., Toplicic-Curcic, A., Despotovic, I. M. and Ristic, N. S. *Ibid.* "Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate." 1129-1133.

²¹¹ De Brito, J. *Ibid.* "Abrasion resistance of concrete made with recycled aggregates." **3**(1): 58-64.

Relación de autores y estudios durabilidad											
AÑO	AUTOR	Tamaño		Propiedades							
		G-F	Poros	Abs	Per	Carb.	HD	Retra	Itz	PM	w/c
2011	Chakradhara et al ²¹²	G	x	x							V
2011	Kou, P. et al ²¹³	G	x							x	V
2011	Al-Assadi, et al ²¹⁴	G									V
2011	Zega and MaioDI ²¹⁵	G	x		x					x	V
2012	Xiao, J.C. et al ²¹⁶	G				x					V
2012	Kou and Poon ²¹⁷	G		x		x			x		V
2012	Limbachiya, M. ²¹⁸	G	x	x		x			x		V
2012	Wai, J. et al ²¹⁹	G	x	x	x				x		v

Leyenda. **Tamaño G-F:** Grueso o fino **HD:** Hielo deshielo **Per:** Permeabilidad **Por:** Porosidad **PM:** Propiedades mecánicas **PI:** Prueba industrial. **Abs:** Absorción. **Itz:** interfase. **Fly ash:** Cenizas volantes **P:** Propiedades físicas (densidad, Absorción) **AB:** abrasión resistencia **HD:** Hielo-deshielo. **Retra:** Retracción. **ITZ:** Interfase. **HS:** Humo sílice **SP:** Superplastificante **F:** Refuerzo fibras acero **Carb:** Carbonatación **w/c:** Relación agua/cemento (**V:** Varias w/c).

Tabla 14 Relación de autores y estudios relacionados con la durabilidad desde 2013

Relación autores estudios durabilidad											
AÑO	AUTOR/ES	Tamaño AR		Propiedades							
		GF	Poros	Abs	Per	Carb	HD	R	Itz	PM	w/c
2013	Thomas, C. et al. ²²⁰	G	x	x	x	x			x	x	0,5-0,6
2013	Barbudo, M. et al. ²²¹	G	x	x			abrasi			x	V
2013	Jian and Sun ²²²	G				x					0,4
2013	Guedes, J. et al. ²²³	G	micos						x		V

²¹² Chakradhara, M., Bhattachayy, S. K. and Barai, S. V. (2011). "Behaviour of Recycled Aggregate concrete under drop weight impact load." *Ibid.* **25:** 69-80.

²¹³ Kou, S. C. and Poon, C. S. (2012). "Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate." *Ibid.* **35:** 69-76, *ibid.*

²¹⁴ Al-Assadi, G., Casati, M. J., Fernández, J. and Gálvez, J. C. (2011). "Effect of the curing conditions of concrete on the behaviour under freeze-thaw cycles." *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* **34(7):** 461-469.

²¹⁵ Zega, D. and Maio, I. (2011). "Recycled Concretes Made with Waste Ready-Mix Concrete as Coarse Aggregate." *Journal and materials in civil engineering* **23(3):** 281-286.

²¹⁶ Xiao, J. Z., Lei, B. and Zhang, C. (2012). "On carbonation behavior of recycled aggregate concrete." *Science China Technological Sciences* **55(9):** 2609-2616.

²¹⁷ Kou, S. C., Poon, C. S. and Etxeberria, M. (2011). "Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and poro size distribution of concrete." *Cement & Concrete Composites* **33:** 286-291.

²¹⁸ Limbachiya, M., Meddah, M. S. and Ouchagour, Y. (2012). "Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete." *Construction and Building Materials* **27(1):** 439-449.

²¹⁹ Wai Hoe, K., Mahyuddin, R., Kenn Jhun, K. and Mohd Zailan, S. (2012). "Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties." *Construction and Building Material* **26:** 565-578.

²²⁰ Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A. and Alaejos, P. (2013). "Durability of recycled aggregate concrete." *Ibid.* **40:** 1054-1065.

²²¹ Barbudo, A., de Brito, J., Evangelista, L., Bravo, M. and Agrela, F. (2013). "Influence of water-reducing admixtures on the mechanical performance of recycled concrete." *Journal of Cleaner Production* **59:** 93-98.

²²² Jian, G. and Sun, J. (2013). "Characteristics of the carbonation resistance of recycled fine aggregate concrete." *Construction and Building Materials* **49:** 814-820.

Relación autores estudios durabilidad											
AÑO	AUTOR/ES	Tamaño AR		Propiedades							
		GF	Poros	Abs	Per	Carb	HD	R	Itz	PM	w/c
2013	Rodrigues, F. ²²⁴	GF	x	x							0,4-0,6
2013	Wang, W. et al. ²²⁵	G							x		ionCl ⁻
2013	Chenn, S. et al. ²²⁶	G							x		V
2014	Beltrán, et al. ²²⁷	G	x	x	x				x	x	0,6
2014	Soares, D. et al. ²²⁸	G	x	x		x			x		0,4-0,6
2014	Bogas, C. et al. ²²⁹	G		x							V
2014	Sidorova, et al. ²³⁰	G								itz	H-Cer
2014	García et al. ²³¹	G				x					V
2014	Jiménez, C. et al. ²³²	G	x	x	x		Ion-				Bolomey
2014	Gaedicke, C. et al. ²³³	G	x	abrasio							0,5
2014	Faleschini, F. et al. ²³⁴	G	reolo								V
2014	Shin, E. et al. ²³⁵	G	x	x							V
2014	González, A. et al. ²³⁶	G	x	x						pm	0,8
2014	Saravanakumar, P. ²³⁷	G	x	x						x	V
2014	Kanellopoulos al. ²³⁸	G	x	x						x	0,5

²²³ Guedes, M., Evangelista, L., de Brito, J. and Ferro, A. C. (2013). "Microstructural Characterization of Concrete Prepared with Recycled Aggregates." *Microscopy and Microanalysis* **19**(5): 1222-1230.

²²⁴ Rodrigues, F., Evangelista, L. and de Brito, J. (2013). "A New Method to Determine the Density and Water Absorption of Fine Recycled Aggregates." *Materials Research-Ibero-American Journal of Materials* **16**(5): 1045-1051.

²²⁵ Wang, W.-I., Kou, S.-c. and Xing, F. (2013). "Deformation properties and direct shear of medium strength concrete prepared with 100% recycled coarse aggregates." *Construction and Building Materials* **48**: 187-193.

²²⁶ Chen, S.-H., Wang, H.-Y. and Zhou, J.-W. Ibid. "Investigating the properties of lightweight concrete containing high contents of recycled green building materials." 98-103.

²²⁷ Beltrán, M. G., Agrela, F., Barbudo, A., Ayuso, J. and Ramírez, A. (2014). "Mechanical and durability properties of concretes manufactured with biomass bottom ash and recycled coarse aggregates." *Construction and Building Material* **72**: 231-238.

²²⁸ Soares, D., Brito, J., Ferreira, J. and Pacheco, J. Ibid. "Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance." **71**: 263-272.

²²⁹ Bogas, J. A. and Gomes, M. G. (2014). "Capillary absorption of structural light aggregate concrete." *Materials and structures*: DOI 10.1671/s 11527-11014-10364-x.

²³⁰ Sidorova, A., Vaquez-Ramonic, E. and Barra-Bicinotto, M. (2014). "Study of recycled aggregates nature's influence on the aggregate-cement paste interface and ITZ." *Construction and Building Material* **68**: 677-684.

²³¹ García-Lodeiro, I., Palomo, J. G., Palomo, A. and Fernández Jimenez, A. (2014). "A statistical approach to the study of concrete carbonation." *Materiales de Construcción* **64**(313).

²³² Jimenez, C., Barra, M., Valls, S., Aponte, D. and Vazquez, E. (2014). "Durability of recycled aggregate concrete designed with the Equivalent Mortar Volume (EMV) method: Validation under the Spanish context and its adaptation to Bolomey methodology." *Materiales de Construcción* **64**(313).

²³³ Gaedicke, C., Marines, A. and Miankodila, F. (2014). "Assessing the abrasion resistance of cores in virgin and recycled aggregate pervious concrete." *Construction and Building Material* **68**: 701-708.

²³⁴ Faleschini, F., Jiménez, C., Barra, M., Aponte, D., Vázquez, E. and Pellegrino, C. (2014). "Rheology of fresh concretes with recycled aggregates." *Construction and Building Material* **73**: 417-424.

²³⁵ Shin, M., Kim, K., Gwon, S. W. and Cha, S. (2014). "Durability of sustainable sulfur concrete with fly ash and recycled aggregate against chemical and weathering environments." *Construction and Building Materials* **69**: 167-176.

²³⁶ González, A. and Etxeberria, M. Ibid. "Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete." **52**: 227-235.

²³⁷ Saravanakumar, P. and Dhinakaran, G. (2014). "Durability aspects of HVFA-based recycled aggregate concrete." *Magazine of Concrete Research* **66**(4): 186-195.

²³⁸ Kanellopoulos, A., Nicolaidis, D. and Petrou, M. F. (2014). "Mechanical and durability properties of concretes containing recycled lime powder and recycled aggregates." *Construction and Building Materials* **53**: 253-259.

Relación autores estudios durabilidad											
AÑO	AUTOR/ES	Tamaño AR		Propiedades							
		GF	Poros	Abs	Per	Carb	HD	R	Itz	PM	w/c
2014	Yoda et al. ²³⁹	G		x		x			x		
2014	Sun, G. et al. ²⁴⁰	G				lon-			x		
2014	Duan and Poon. ²⁴¹	G				lon- Cl-			x	redes	x
2014	Matias, D. et al. ²⁴²	GF	x	x		x			x	x	,4,6
2014	González, A. e al. ²⁴³	G	x	x		clh				x	,5
2014	Salleham, I. et al. ²⁴⁴	G							x	x	V
2015	Silva, V, et al. ²⁴⁵	GF	x	x					X		V
2015	Bravo, M. et al. ²⁴⁶	GF	x	x		x			x	x	0,4-0,5
2015	Xiao, J. et al. ²⁴⁷	G							x		V
2015	Cartuxo, F. et al. ²⁴⁸	F		x					x		V
2016	Medina, C. et al. ²⁴⁹	G		x		x			x		V
2016	Wang, C. et al. ²⁵⁰	G				x			x		V
2016	Vieria, T. et al. ²⁵¹	F	x	x	x						V

Leyenda. **Tamaño G-F:** Grueso o fino **HD:** Hielo deshielo **Per:** Permeabilidad **Por:** Porosidad **PM:** Propiedades mecánicas **PI:** Prueba industrial. **Abs:** Absorción. **Itz:** interfase. **Fly ash:** Cenizas volantes **P:** Propiedades físicas (densidad, Absorción) **AB:** abrasión resistencia **HD:** Hielo-deshielo. **R:** Retracción. **ITZ:** Interfase, **HS:** Humo sílice **SP:** Superplastificante **F:** Refuerzo fibras acero **Carb:** Carbonatación **w/c:** Relación agua/cemento (**V:** Varias w/c).

²³⁹ Yoda, K. and Shintani, A. Ibid. "Building application of recycled aggregate concrete for upper-ground structural elements." **67**(PART C): 379-385.

²⁴⁰ Sun, L., Ge, D., Ren, F., Liang, R., Wang, Z. and Hao, H. (2014). "Recycled aggregate concrete by using waste concrete as aggregate in construction working place." Beijing Jiaotong Daxue Xuebao/Journal of Beijing Jiaotong University **38**(1): 20-23+28.

²⁴¹ Duan, Z. H. and Poon, C. S. (2014). "Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars." *Materials and Design* **58**: 19-29.

²⁴² Matias, D., Brito, J. and Rosa, A. (ASCE 2014). Durability of Concrete with Recycled Coarse Aggregates: Influence of Superplasticizers, American Society of Civil Engineers.

²⁴³ Gonzalez-Corominas and Etxeberria, M. (2014). "Properties of high performance concrete made with recycled fine ceramic and coarse mixed aggregates." *Construction and Building Material* **68**: 618-626.

²⁴⁴ Salleham, I. and Mahyuddin, R. (2014). "Mechanical strength and drying shrinkage properties of concrete containing treated coarse recycled concrete aggregates." *Materials and Structures* **68**: 726-739.

²⁴⁵ Silva, R. V., De Brito, J. and Dhir, R. K. (2015). "Prediction of the shrinkage behavior of recycled aggregate concrete: A review." *Construction and Building Materials* **77**: 327-339.

²⁴⁶ Bravo, M., De Brito, J., Pontes, J. and Evangelista, L. Ibid. "Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants." 357-369.

²⁴⁷ Xiao, J., Fan, Y. and Tam, V. W. Y. (2015). "On creep characteristics of cement paste, mortar and recycled aggregate concrete." *European Journal of Environmental and Civil Engineering* **19**(10): 1234-1252.

²⁴⁸ Cartuxo, F., De Brito, J., Evangelista, L., Jiménez, J. R. and Ledesma, E. F. (2015). "Rheological behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates - Influence of the superplasticizer." *Construction and Building Materials* **89**: 36-47.

²⁴⁹ Medina, C., Sánchez De Rojas, M. I., Thomas, C., Polanco, J. A. and Frías, M. (2016). "Durability of recycled concrete made with recycled ceramic sanitary ware aggregate. Inter-indicator relationships." Ibid. **105**: 480-486.

²⁵⁰ Wang, C., Xiao, J., Zhang, G. and Li, L. Ibid. "Interfacial properties of modeled recycled aggregate concrete modified by carbonation." 307-320.

²⁵¹ Vieira, T., Alves, A., de Brito, J., Correia, J. R. and Silva, R. V. (2016). "Durability-related performance of concrete containing fine recycled aggregates from crushed bricks and sanitary ware." *Materials and Design* **90**: 767-776.

La durabilidad se define como la capacidad del hormigón para permanecer estable a lo largo de la vida útil de la estructura frente a las acciones físicas y químicas de carácter agresivo. La durabilidad del hormigón se refiere a su capacidad para resistir la acción de la intemperie, el ataque químico, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro²⁵².

Un elemento de hormigón armado se proyecta para que sea resistente y estable a lo largo del tiempo.

En la durabilidad influyen todas las actuaciones en las distintas fases del proceso constructivo, a saber:

- *Proyecto: Diseño estructural.*
- *Materiales: Componentes del hormigón y acero.*
- *Ejecución: Compactación y curado.*
- *Mantenimiento.*

En la Fig. 16 se aprecian de forma global los distintos factores que intervienen en la durabilidad de una estructura. Para un determinado ambiente, los elementos que más influyen en la durabilidad del hormigón son el agua y el mecanismo de transporte a través de los poros. Obviamente el agua contiene los elementos agresivos disueltos y los poros y fisuras facilitan su penetración.

El tipo de ambiente al que está sometida la estructura viene definido por el conjunto de condiciones físicas y químicas a las que está expuesta, y que puede llegar a provocar su degradación, como consecuencia de efectos diferentes a los de las cargas y sollicitaciones consideradas en el cálculo.

Los procesos que afectan a la durabilidad del hormigón se pueden agrupar en:

- *Procesos físicos.*
- *Procesos químicos.*

²⁵² ACI-201-SR-05 (2008). Guide to Durable Concrete. A. c. Institute. Michigan.

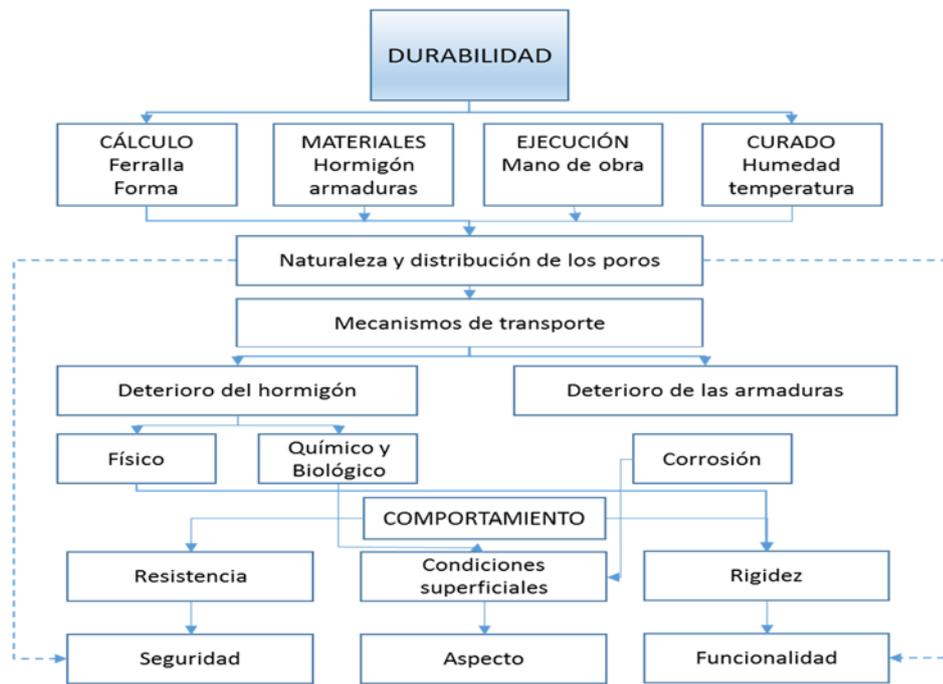


Fig. 16 Factores que afectan a la durabilidad del hormigón²⁵³.

El mecanismo de transporte tiene lugar a través de la red de poros que se encuentran en la pasta de cemento.

En relación con los factores que pueden afectar al hormigón reciclado, las investigaciones concluyen que la durabilidad del mismo se ve reducida a medida que aumenta el porcentaje de árido reciclado presente en la mezcla. No obstante, existen discrepancias respecto a dichos estudios porque algunos autores como Olorunsogo²⁵⁴, Kou²⁵⁵, llegan a la conclusión de que la durabilidad puede mejorar sensiblemente con la edad de curado.

En relación con las conclusiones anteriormente mencionadas, cabe afirmar que las características de durabilidad pueden estar más condicionadas a la relación agua/cemento, por lo cual no se consideraría significativa la influencia de los áridos reciclados en propiedades como la permeabilidad del hormigón, que está estrechamente conectada con la durabilidad (Lopez-Gayarre²⁵⁶).

²⁵³ G:E.H.O. (Octubre 1993). "Durabilidad de estructuras de hormigón. Guía de Diseño del CEB." Boletín N°12 Del GEOH.

²⁵⁴ Olorunsogo, F. T. and Padayachee, N. (2002). "Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes." *Cement and Concrete Research* **32**(2): 179-185.

²⁵⁵ Kou, S. C., Poon, J. and Agrela, F. (2011). "Comparisons of natural and recycled aggregate concrete prepared with de addition of different minerale admixtures." *Cement and concrete composites* **33**(8): 788-795.

²⁵⁶ Lopez-Gayarre, F. (2008). Influencia en la variación de los parámetros de dosificación y fabricación de hormigón reciclado estructural sobre las propiedades físico mecánicas. Departamento de construcción e ingeniería de fabricación, Universidad Oviedo.

Por otra parte, la mejora de la interfase o la mejor calidad de la pasta incorporada supone una mejora o la menor influencia negativa de la porosidad del árido de origen, esto se valida con hormigones de mejor calidad, o con pastas de cemento de mejores prestaciones²⁵⁷.

2.4.3.1. Clases de exposición

Una de las causas de deterioro del hormigón es la penetración del CO₂ del aire, desde la superficie hacia el interior a través de los poros originando la carbonatación y como consecuencia la desprotección frente a la corrosión de las armaduras. Análogas consideraciones pueden hacerse con respecto a la penetración de cloruros y a la oxidación por el oxígeno del aire. El espesor del recubrimiento es fundamental para asegurar la protección frente a los agentes mencionados.

El período durante el cual el recubrimiento protege a las armaduras es proporcional al cuadrado del espesor de dicho recubrimiento. Por tanto un espesor doble significa un período de protección cuatro veces mayor.

En los estudios realizados por López Agüi ²⁵⁸, proponen tablas para obtener directamente el recubrimiento mínimo. Las tablas son las que están incluidas en la EHE, ampliadas con el resultado de aplicar el contenido del Anejo nº 9 de dicha Instrucción.

2.4.3.2. Red capilar. Estructura de los poros

La red capilar se forma como consecuencia de la evaporación del exceso de agua de la mezcla, durante el amasado, siendo superior a la necesaria para la hidratación del cemento. El exceso es imprescindible para la correcta puesta en obra del hormigón.

La red capilar se verá incrementada en función de los siguientes factores:

- *Si aumenta la relación agua/cemento.*
- *Si disminuye la finura de molido del cemento.*
- *Aumenta si la composición granulométrica es deficiente.*

La clasificación general de los poros es como sigue:

²⁵⁷ Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A. and Alaejos, P. (2013). "Durability of recycled aggregate concrete." *Construction and Building Material* **40**: 1054-1065.

²⁵⁸ Lopez Agüi, J. (2008). "IECA."

- *Microporos: poros de gel. Tienen un radio medio del orden de una centésima de micra y no tienen influencia apreciable en la durabilidad ($0,1\mu\text{m}$).*
- *Poros capilares: Su radio medio es del orden de una milésima de milímetro y tienen influencia apreciable sobre la durabilidad ($1\mu\text{m}$).*
- *Macroporos: Su radio medio alcanza valores próximos al milímetro e influyen de forma importante en la durabilidad del hormigón. Se subdividen en:*
 - *Aire ocluido 1 mm.*
 - *Poros de compactación $100\mu\text{m}$ -1mm.*

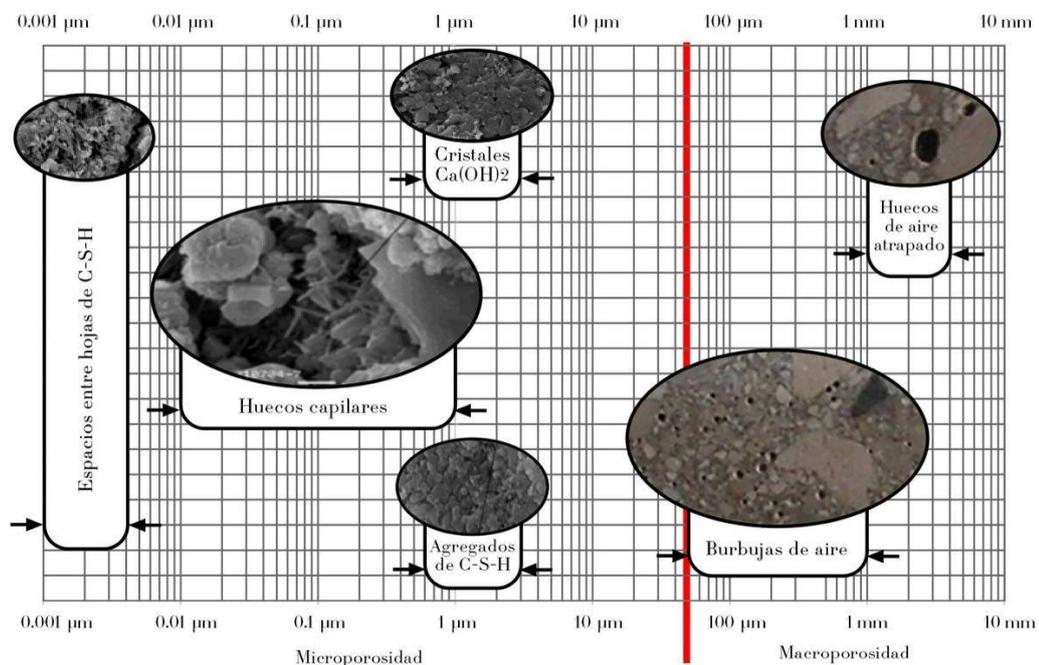


Fig. 17 Distribución de tamaños de poros²⁵⁹.

Los poros del hormigón están situados en la pasta de cemento que constituye la fase intermedia entre los granos de árido. Los poros son cavidades con geometrías irregulares que forman una red tridimensional entre los granos. Dichas cavidades están ocupadas por aire, agua o por ambos.

Además de los poros capilares, durante el proceso de amasado del hormigón, queda retenida gran cantidad de aire que incrementa la porosidad. Este efecto puede ser evitado, en gran medida gracias a la utilización de métodos de compactación adecuados a la consistencia de aquel.

²⁵⁹ Thomas, C. (2010). Hormigón reciclado de aplicación estructural: Durabilidad en ambiente marino y comportamiento a fatiga. Tesis. Departamento de Ciencia e Ingeniería de Terreno y de los Materiales. Santander, Universidad de Cantabria: 458.

Dichos poros originados por el aire retenido son esféricos y su dimensión oscila entre 50 y 200 μm y pueden afectar negativamente a la impermeabilidad.

La absorción del agua y su transporte a través del hormigón constituyen los factores fundamentales en el deterioro de aquel. Dicho transporte, viene condicionado por el tamaño, distribución e interconexión de poros y fisuras. Estos parámetros condicionan la permeabilidad del hormigón, la cual influye de forma decisiva en la durabilidad, ya que una vez producida la absorción capilar desde la superficie, el agua circula por el hormigón en función de la permeabilidad de éste. Dicha circulación permite el transporte de agentes agresivos disueltos que pueden provocar el deterioro del hormigón y del acero en el caso del hormigón armado.

La Fig. 18 muestra un esquema de cómo el volumen de poros capilares disminuye a medida que avanza el proceso de hidratación. Los productos hidratados rellenan parcialmente los poros capilares, por ser de mayor volumen que el cemento anhidro.

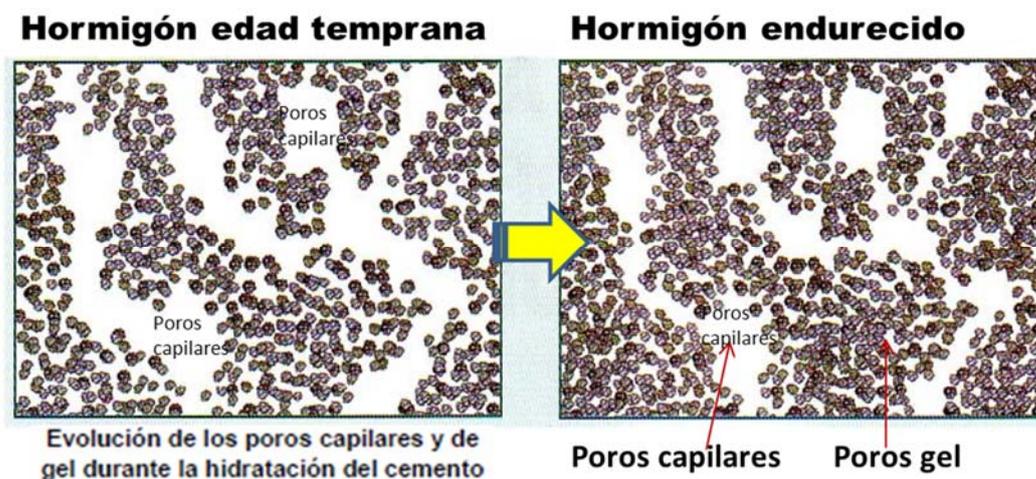


Fig. 18 Esquema red capilar y su evolución tras la rehidratación de sus componentes.

En este sentido, una adecuada relación w/c , y un prolongado tiempo de curado húmedo, son necesarios para generar discontinuidad entre los poros capilares.

El efecto de aditivos reductores de agua y superplastificantes y la inclusión de aditivos con aportación de nanosílice reducen la porosidad y aumentan la durabilidad.

2.4.3.3. Porosidad

La porosidad se define en el como la relación entre el volumen de poros y su volumen aparente. En relación con la durabilidad, se entiende por porosidad del hormigón la relación entre el volumen de poros accesibles al agua y el volumen aparente de la muestra de hormigón, expresada en tanto por ciento.

La estabilidad del hormigón depende de la facilidad que presente a la entrada de gases y agua con sustancias agresivas. Un valor alto de la humedad ambiente se traduce en un llenado de agua de los poros de mayor diámetro, reduciéndose el espacio accesible para la difusión de gases. Por esta circunstancia, en hormigones saturados de agua, la difusión de gases como oxígeno y dióxido de carbono es prácticamente despreciable.

En la pasta de cemento se sitúan los poros del hormigón, cuya red constituye un factor determinante en la absorción de agua del hormigón.

La porosidad de los hormigones reciclados es superior a la de los hormigones convencionales como consecuencia de la pasta de cemento que rodea los áridos reciclados. Las investigaciones llevadas a cabo en diversos estudios (Nagataki²⁶⁰, Buyle-Bodin²⁶¹), permiten constatar que la incorporación de porcentajes de árido reciclado inferiores al 50 % en peso incrementa ligeramente la porosidad. Cuando la sustitución de árido grueso es total, la porosidad presenta incrementos que oscilan del 10% al 70% respecto al hormigón de control²⁶².

No obstante, no es la porosidad el parámetro total que interesa conocer, si no la porosidad abierta, es decir la que está conectada con el exterior, pues el transporte de materias nocivas se llevará a cabo a través de esta vía.

En función de la porosidad, el CEB ²⁶³ clasifica los hormigones según la *Tabla 15*:

Tabla 15 Calidad del hormigón según su porosidad.

Porosidad	Calidad del hormigón
<15%	Buena
15-17%	Media
>17%	Pobre

La porosidad a largo plazo experimenta una reducción para un hormigón con árido reciclado frente a un hormigón con árido natural. Algunos estudios realizados

²⁶⁰ Nagataki, S., Gokce, A. and Saeki, T. (2000). Effects of recycled aggregate characteristics on the performance parameters of recycled aggregate concrete. Proceedings of the Fifth Canner/ACI International conference on Durability Concrete, Barcelona.

²⁶¹ Buyle-Bodin, F. H. R. (2002). "Influence of Industrially Produced Recycled Aggregate Concrete." *Materiales and Structures* 35(8): 504-509.

²⁶² Sánchez, M. (2005). Estudio sobre la utilización de árido reciclado en Hormigón Estructural. Tesis. Departamento de construcciones Arquitectónicas. Madrid, Universidad Politécnica de Madrid.

²⁶³ CEB (1998). Comité Euro-International du Béton. Strategies for testing and Assessments of concrete structures affected by reinforcement corrosion. C. E.-I. d. Beton. Lausanne (Suiza), Bulletin 243.

demuestran que la porosidad a 5 años se reduce entre un 7% y un 45% para un hormigón reciclado (Kou et al²⁶⁴).

Otras investigaciones (Andrea²⁶⁵), demuestran también la reducción en la porosidad entre 28 y 365 días en porcentajes de 5 al 15%.

2.4.3.4. Absorción

La capacidad de absorción de un material se puede expresar mediante la porosidad abierta o accesible. En este caso medimos el volumen de líquido que ha sido absorbido por una determinada probeta de hormigón en un tiempo dado.

La porosidad abierta se expresa como relación entre el volumen de los poros accesibles, calculada por diferencia de peso saturado y peso seco, con el peso aparente de la muestra expresada en tanto por ciento. Dicha relación cuantifica el volumen de huecos accesibles y su capacidad de retención de agua.

Los estudios realizados por Katz²⁶⁶, Arredondo²⁶⁷, Barra²⁶⁸ y Sagoe-Crentsil²⁶⁹, confirman que en los hormigones reciclados la absorción se incrementa en valores importantes cuando la sustitución es del 100% llegando a duplicar la absorción del hormigón de control. A continuación, se muestra un comparativo de diferentes autores en el estudio de la absorción del hormigón reciclado cuyo ajuste se adapta a una curva logarítmica (Fig. 19).

²⁶⁴ Kou, S. C., Poon, J. and Agrela, F. (2011). "Comparisons of natural and recycled aggregate concrete prepared with de addition of diferente minerale admixtures." *Cement and concrete composites* **33**(8): 788-795.

²⁶⁵ Andrea, V. (2012). Durabilidad en hormigones armados con árido reciclado. Una evaluación de la corrosión en ambiente marino. Tesis. Valencia, Universida Politecnica Valencia: 359.

²⁶⁶ Katz, A. (2003). "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete." *Cement and Concrete Research* **33**(5): 703-711.

²⁶⁷ Arredondo, F. (1977). Dosificación de Hormigón. Manuales y Normas del Instituto Eduardo Torroja de la construcción y del cemento. Madrid.

²⁶⁸ Barra, M. (1996). Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón estructural. Departamento de construcciones. , Universidad Politécnica Cataluña.

²⁶⁹ Sagoe-Crentsil, K. K., Brown, T. and Taylor, A. H. (2001). "Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate." *Cement and Concrete Research* **31**(5): 707-712.

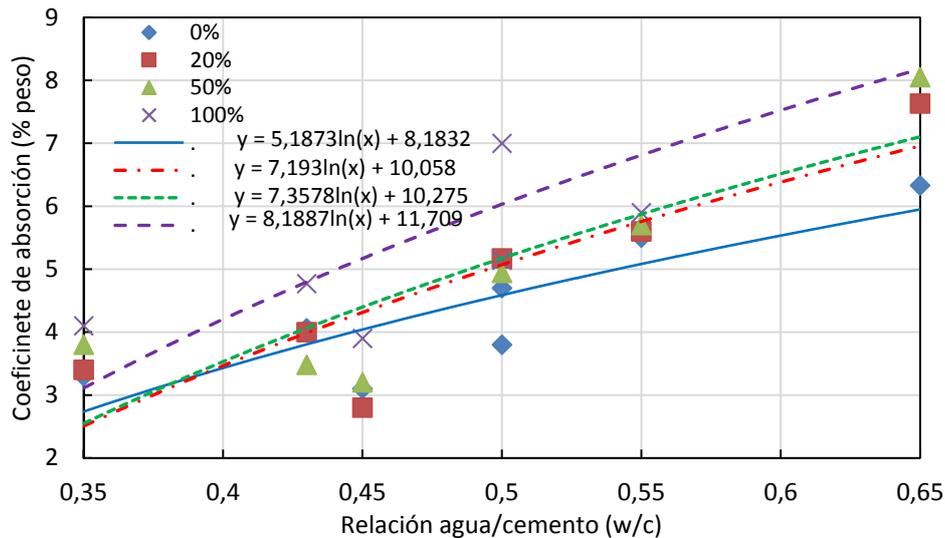


Fig. 19 Coeficiente de absorción entre diferentes grados de sustitución analizados con referencia a bibliografía específica de estudios, Katz²⁷⁰, Thomas²⁷¹, Pérez Benedicto²⁷² Pinto Varela²⁷³.

Tal y como se observa en la gráfica, la convergencia de las curvas hacia una menor relación agua/cemento, supone una tendencia clara de la influencia entre el árido y la pasta de mejor calidad que anulo al efecto del árido reciclado.

2.4.3.5. Succión capilar

La succión capilar es la capacidad de los materiales porosos de absorber agua por capilaridad. Los poros capilares constituyen la parte de volumen no ocupada por los productos de la hidratación y su importancia depende del grado de hidratación y de la relación agua/cemento.

Los estudios realizados por varios autores como Olorunsogo²⁷⁴, Ajdukiewicz²⁷⁵, Rilem²⁷⁶, demuestran que el valor de la capilaridad en hormigón con áridos reciclados es superior al hormigón de control.

²⁷⁰ Katz, A. (2003). "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete." *Ibid.* **33**: 703-711.

²⁷¹ Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A. and Alaejos, P. (2013). "Durability of recycled aggregate concrete." *Construction and Building Material* **40**: 1054-1065.

²⁷² Pérez Benedicto, J. A. (2011). Estudio experimental sobre propiedades mecánicas del hormigón reciclado con áridos procedentes de la no calidad. Departamento de construcciones Madrid, Universidad Politécnica de Madrid.

²⁷³ Pinto-Varela, E. (2012). Evaluación de la sostenibilidad ambiental de hormigones con áridos reciclados de residuos de construcción y demolición. Tesis. Barcelona, Universidad Politécnica Cataluña.

²⁷⁴ Olorunsogo, F. T. and Padayachee, N. (2002). "Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes." *Cement and Concrete Research* **32**(2): 179-185.

²⁷⁵ Ajdukiewicz, A. and Kliszczewicz, A. (2002). "Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC." *Cement & Concrete Composites* **24**(2): 269-279.

²⁷⁶ RILEM (2006). "(International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures) Specifications for Concrete with Recycled Aggregates." *Materials and Structures*.

2.4.3.6. Penetración de agua bajo presión

Los procesos de degradación del hormigón dependen de la permeabilidad entendida como la mayor o menor facilidad de transporte o flujo de gases o líquidos a través de un material poroso, con la aplicación de una diferencia de presión. Existen varios sistemas para evaluar la permeabilidad del hormigón, ensayo de permeabilidad a los gases²⁷⁷ (*caudal que atraviesa una probeta con las caras laterales selladas*) y, el más utilizado, el ensayo de penetración al agua²⁸² en el que se aplica el agua a presión por una de las caras, para posteriormente romper la probeta y determinar así la profundidad máxima de penetración de aquellas.

Al evaluar la penetración de agua bajo presión, no existe un patrón en función del aumento del AR, incluso se han observado disminuciones con sustituciones de un 100%, en relación a sustituciones menores²⁷⁸. Otros estudios responden a una disminución de la permeabilidad con altos porcentajes de sustitución (Sánchez de Juan²⁷⁹, González Fuenteboa²⁸⁰, Barra²⁸¹). Los porcentajes de aumento oscilan entre un 15% a 70% al aumentar el porcentaje de sustitución.

La instrucción EHE establece que para ambientes agresivos como ambiente marino (IIa y IIIc), se considera suficientemente impermeable, si el ensayo de penetración de agua²⁸², cumple con los límites de profundidad máxima menor a 50 mm y menor a 30 mm para ambientes agresivos.

2.4.3.7. Fisuración

Es evidente que la fisuración facilita el transporte de los gases y agentes disueltos en las aguas, por lo tanto su control es un factor fundamental en la durabilidad de las estructuras.

Las fisuras debidas a la acción de las cargas, son las menos habituales en las estructuras puesto que están debidamente controladas en el proyecto. Las más habituales y, más difíciles de evitar, son las fisuras de retracción y las fisuras térmicas.

²⁷⁷ Buyle-Bodin, F. H. R. (2002). "Influence of Industrially Produced Recycled Aggregate Concrete." *Materiales and Structures* **35**(8): 504-509.

²⁷⁸ Zega, D. and Maio, I. (2011). "Recycled Concretes Made with Waste Ready-Mix Concrete as Coarse Aggregate." *Journal and materials in civil engineering* **23**(3): 281-286.

²⁷⁹ Sánchez, M. and Alaejos, P. (2012). Estudio sobre las propiedades del hormigón fabricado con áridos reciclados. Monografías CEDEX. M. d. Fomento. Madrid. Monografías: 220.

²⁸⁰ González Fuenteboa, B. (2002). Hormigones con áridos reciclados procedentes de demoliciones: Dosificaciones, propiedades mecánicas y comportamiento estructural a cortante. Tesis. E.T.S.I Caminos Canales y Puertos, A Coruña.

²⁸¹ Barra, M. (1996). Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón estructural. Departamento de construcciones. Universidad Politécnica Cataluña.

²⁸² UNE-EN-12390-8 (2006). Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Ensayo de permeabilidad al agua bajo presión.

Para valorar la durabilidad del hormigón se analizan fundamentalmente las fisuras de retracción, retracción plástica y fisuras térmicas.

Existen otros tipos de fisuras, como las originadas por la expansión del hormigón, que serán tratadas al analizar el ataque por agentes químicos, debido a que suelen generarse por ataque al hormigón con aguas que contienen sulfatos o por áridos que contengan sulfuros oxidables.

La retracción es un fenómeno no deseado, que aparece en los primeros días posteriores al hormigonado y se puede prolongar durante meses. Su control es fundamental para la durabilidad y estética de los elementos prefabricados con hormigón confeccionado o no con áridos reciclados, especialmente los paneles de fachada que expuestos a los agentes atmosféricos deben mantener las condiciones de resistencia, impermeabilidad y estética a lo largo de la vida útil prevista.

Se analizan a continuación los tipos de fisuras que pueden presentarse en los elementos de hormigón armado.

2.4.3.8. Acciones mecánicas

Son las acciones previstas en el cálculo, constituidas principalmente por acciones directas tales como cargas, acciones indirectas como son las deformaciones impuestas, y finalmente los efectos de impacto y vibraciones. La actuación de las acciones introduce deformaciones e incluso fisuración en los elementos de hormigón.

En los hormigones reciclados el módulo de elasticidad se reduce sensiblemente tal como se constata en los coeficientes de corrección calculados por Sánchez-Alaejos²⁸³ y por consiguiente se ha de valorar el incremento en las deformaciones en comparación con el hormigón normal.

El ensayo de vigas de HR realizado por Ajdukiewicz²⁸⁴, constata que las deformaciones instantáneas superaron a las del hormigón de control desde el 18% hasta valores próximos al 100%.

2.4.3.9. Retracción

La retracción del hormigón consiste en la contracción del hormigón cuando el proceso de fraguado y endurecimiento se produce en el aire. Dicho fenómeno se genera por la pérdida del agua contenida en el hormigón en distintos estados.

²⁸³ Sánchez, M. and Alaejos, P. (2012). Estudio sobre las propiedades del hormigón fabricado con áridos reciclados. Monografías CEDEX. M. d. Fomento. Madrid. Monografías: 220.

²⁸⁴ Ajdukiewicz, A. and Kliszczewicz, A. (2007). "Comparative test of beams and columns made of recycled aggregates concrete and natural aggregate concrete." *Journal of advance concrete technology* 5: 259.

La retracción es una deformación impuesta que provocará tensiones y las fisuras consiguientes, cuando el libre acortamiento del hormigón se encuentre impedido. Las mencionadas fisuras afectarán de forma directa a la durabilidad del hormigón y la apariencia final.

Dependiendo de la edad del hormigón, se tendrán diferentes tipos de retracción. El siguiente esquema Fig. 20 se visualizan los diferentes tipos:



Fig. 20 Cuadro de retracción desde la retracción plástica en el periodo de exudación del hormigón a la retracción hidráulica que puede tener lugar hasta los tres años²⁸⁵.

A partir del gráfico anterior se clasifican a continuación las diferentes características de cada una de las retracciones.

2.4.3.9.1. Retracción plástica

Se debe establecer una diferenciación clara entre la retracción por secado que empieza cuando se cumple el período de secado y la que ocurre con el hormigón fresco durante dicho período. Éstos son cambios de volumen que se producen cuando el hormigón se encuentra en estado plástico (hormigón que no ha alcanzado el endurecimiento) y son debidos tanto a la evaporación en la superficie como a la succión en la capa inferior de hormigón sustentada en las sub-bases o encofrados.

La generación de esta retracción es debida a que las partículas de hormigón fresco están rodeadas de agua y al producirse evaporación, se forman meniscos entre las mismas, generando presión capilar.

La presión descrita induce una reducción de volumen de la pasta de cemento y cuando dicha presión alcanza un valor crítico, el agua inmersa en el hormigón se reagrupa, creando vacíos que provocan la retracción.

La fisuración aparece debido a que en las primeras horas de edad, la contracción superficial del hormigón está impedida por el resto del hormigón que aún se

²⁸⁵ Fernández Cánovas, M. (2006). Hormigón Armado, Madrid.

mantiene estable dimensionalmente. Esta restricción genera tensiones de tracción que el hormigón en estado fresco no puede soportar y se fisura.

Una forma eficaz de prevenir la retracción plástica, es minimizar la tasa de evaporación de agua de la superficie del hormigón. Se recomienda que no se exceda de 1 kg/m² por hora. Se debe recordar que la evaporación se incrementa cuando la temperatura del hormigón es mucho mayor que la temperatura ambiente; bajo tales circunstancias, la contracción plástica puede ocurrir incluso si la humedad relativa del aire es alta. Por esto es recomendable proteger el hormigón del sol y el viento inmediatamente después de ser vertido y procurar un curado adecuado²⁸⁶.

2.4.3.9.2. *Retracción autógena*

Es resultado de la autodesecación del hormigón, cuando no es añadida agua adicional de curado, por lo que el hormigón comienza a consumir químicamente agua durante la hidratación.

En un hormigón convencional, la retracción autógena es relativamente baja con valores típicos de 40 µm para edades tempranas y de 100 a 150 µm a largo plazo.

La retracción autógena presentaba, tradicionalmente, valores muy bajos en relación a los registrados en la retracción por secado, en cambio en los hormigones actuales pueden alcanzarse valores relativamente importantes (todo aquello que aumenta la tasa de hidratación), si concurren varios de los factores que se relacionan a continuación:

- *Cementos con alto contenido en C3A (aluminato tricálcico).*
- *Relación agua/cemento baja.*
- *Aditivos reductores de agua.*
- *Presencia de fillers.*

En estos casos la tasa de retracción autógena puede ser incluso superior a la de secado.

2.4.3.9.3. *Retracción por secado*

Se diferencia de la autógena en que la pérdida de agua no es usada en la reacción del cemento, se pierde en el ambiente. La retracción que el hormigón

²⁸⁶ Neville, A. (2011). *Propiedades of concrete*. Book. London: Pearson Education Limited.

experimenta, se debe básicamente a la deformación volumétrica de contracción originada por la pérdida de agua dentro del material. Dicho proceso es sólo posible cuando existe un gradiente de humedad relativa entre el medio ambiente y la estructura.

Para el estudio de la retracción por secado, cuyo rango se encuentra entre 45-90%²⁸⁷ de los valores de retracción total, se adopta generalmente como variable la humedad relativa y en éste el esfuerzo capilar es más importante.

Para hormigones convencionales bajo condiciones estándar (23°C y humedad relativa del 50%), la retracción por secado medida sobre probetas entre 75 y 150 mm, generalmente encuentra rangos de 400-800 µm después de 2 años

De acuerdo con Jiménez Montoya²⁸⁸ el hormigón contiene agua (aparte de la combinada químicamente) en cuatro estados:

- *Agua intercrystalina.*
- *Agua de gel.*
- *Agua adsorbida, que forma meniscos en la periferia de la pasta de cemento.*
- *Agua capilar o libre.*

De estos estados, el agua capilar y parte de la adsorbida pueden evaporarse a la temperatura ordinaria.

La causa de la retracción consiste en que el hormigón, va perdiendo agua capilar y parte del agua adsorbida, lo cual origina una contracción de meniscos que obliga a que los granos de árido se aproximen entre sí.

2.4.3.9.4. *Retracción por carbonatación*

Se presenta cuando queda cierta proporción de material cementante sin hidratar, susceptible de reaccionar con el CO₂ del aire, produciendo carbonato cálcico, combinación química que tiene carácter contractivo disminuyendo el volumen inicial, generándose la denominada retracción por carbonatación. Siendo sus valores muy pequeños y despreciables.

²⁸⁷ Sánchez, M. and Alaejos, P. (2012). Estudio sobre las propiedades del hormigón fabricado con áridos reciclados. Monografías CEDEX. M. d. Fomento. Madrid. Monografías: 220.

²⁸⁸ Jimenez Montoya (2009). Hormigón Armado. Madrid.

2.4.3.10. Retracción en hormigones con árido reciclado

El empleo de árido reciclado provoca una mayor retracción en el hormigón que el árido natural. Las variaciones dependen del porcentaje de sustitución en la dosificación. El aumento de retracción se sitúa entre el 10-35%, para hormigones con sustituciones de un 100%, como han encontrado Limbachiya²⁸⁹ y Ravindraraja²⁹⁰ o incluso alcanzan valores mayores hasta un 70% respecto del hormigón de control registrado en los estudios de Domingo²⁹¹. Otros estudios referenciados constatan que sustituciones de 20%-30%-50% experimentan desde descensos del 10% hasta incrementos del 37% (Sánchez de Juan²⁹²).

Evidentemente, el método de dosificación, procedimiento de fabricación y las condiciones de curado, son variables fundamentales.

Existen tendencias por las que un hormigón fabricado con áridos de alta calidad o provenientes de hormigones de resistencias altas, producen mayores retracciones que los hormigones con áridos reciclados procedentes de hormigones de peor calidad²⁹³.

Para los hormigones autocompactantes, en el que el empleo de cierta cantidad de filler incrementa el volumen de pasta, también aumentan los valores de retracción para altos grados de sustitución. Loser²⁹⁴ compara el incremento atendiendo al incremento del volumen de pasta respecto de un hormigón tradicional y no autocompactante.

Otros estudios recientes debidos a Salleham²⁹⁵, en los que el árido grueso es tratado con agentes químicos, obtienen resultados favorables en cuanto a retracción por secado.

²⁸⁹ Limbachiya, M. C., Leelawat, T. and Dhir, R. K. (2000). "Use of Recycled concrete Aggregates in High-strength concrete " *Materials and Structures* **33**: 574-580.

²⁹⁰ Ravindrarajha, R. and Tam, c. (1987). "Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate." *Magacin of Concrete Research* **37**(130): 29-38.

²⁹¹ Domingo, A., Lázaro, C., Gayarre, F. and Serrano, M. (2009). "Long term deformations by creep and shrinkage in recycled aggregate concrete." *Materiales and Structures* **47**(8): 1147-1160, Domingo, A., Lázaro, C., Gayarre, F., Serrano, M. and Lopez Colina, M. (2009). "Long term deformation by creep and shrinkage in recycled aggregate concrete." *Materials and Structures*.

²⁹² Sánchez, M. and Alaejos, P. (2012). Estudio sobre las propiedades del hormigón fabricado con áridos reciclados. Monografías CEDEX. M. d. Fomento. Madrid. Monografías: 220.

²⁹³ Hansen, T. C. and Marga, M. (1988). Strength of recycled concrete made from coarse and fine recycled concrete aggregate. Demolition and reuse concrete and masonry. Proceeding of the second International RILEM symposium, Kasai, Y.

²⁹⁴ Loser, R. and Leeman, A. (2009). "Shrinkage and restrained shrinkage cracking of self-compacting concrete compared to conventionally vibrated concrete." *Materiales and Structures* **42**: 71-82.

²⁹⁵ Salleham, I. and Mahyuddin, R. (2014). "Mechanical strength and drying shrinkage properties of concrete containing treated coarse recycled concrete aggregates." *Ibid.* **68**: 726-739.

Estudios recientes de Kou²⁹⁶ y Chindaprasirt²⁹⁷ encuentran valores menores de retracción a base de incorporar en la dosificación cenizas volantes, humo de sílice, etc.

2.4.3.11. Resistencia a la helada

El agua, al cambiar de estado líquido a sólido, experimenta un aumento de volumen del 9%, posibilitando la rotura del material si los poros se encuentran saturados con éste. Al helarse el agua introducida en los capilares aumenta de volumen y ejerce un efecto de cuña que fisura el hormigón.

Como medida para evitar la fisuración por heladas, es conveniente la utilización de aireantes, puesto que los poros como consecuencia del aire ocluido son casi estancos y pueden no estar saturados, aunque lo esté el hormigón.

La aplicación de productos de deshielo sobre una superficie helada, provoca un salto térmico que también puede producir fisuras, debido a la diferencia de temperatura entre la superficie y el núcleo de hormigón.

El ataque que sufre el hormigón bajo la helada tiene lugar en la pasta de cemento, como consecuencia de varios fenómenos físicos, tales como el aumento de volumen debido a la formación de hielo, la variación del punto de congelación del agua en función del diámetro de los poros y la existencia de difusión de las moléculas de agua hacia los cristales ya formados.

La resistencia del hormigón frente a la helada, suele determinarse mediante la pérdida de peso de las muestras cuando se someten a sucesivos ciclos de hielo-deshielo, sumergidas en agua o en una solución de sulfato.

Los hormigones reciclados son, en principio, más sensibles a la acción del hielo, que los hormigones convencionales, porque poseen una absorción mayor. Así se puede constatar en los estudios realizados por Kasai²⁹⁸, Fernández Cánovas²⁹⁹ González Fuenteboa³⁰⁰ y Buck³⁰¹.

²⁹⁶ Kou, S. C., Poon, C. S. and Chan, D. (2008). "Influence of fly ash as a cement addition on the hardened properties of recycled aggregate concrete." *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* **41**(7): 1191-1201.

²⁹⁷ Chindaprasirt, P., Homwuttivong, S. and 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.

²⁹⁸ Kasai, Y. (1988). *Guidelines and the Present State of the Reuse of Demolished Concrete in Japan*. Demolition and Reuse of Concrete and Masonry. Proceedings of the Third International RILEM symposium.1 8HN, First Edition Published by E&FN Spon. Edited by Lauritzen. London SE: 1994: 1993-1104.

²⁹⁹ Fernández Cánovas, M. (2006). *Hormigón Armado*, Madrid.

³⁰⁰ González Fuenteboa, B. (2002). *Hormigones con áridos reciclados procedentes de demoliciones: Dosificaciones, propiedades mecánicas y comportamiento estructural a cortante*. Tesis. E.T.S.I Caminos Canales y Puertos, A Coruña.

³⁰¹ Buck, A. (1973). "Recycled concrete." *Highway Research Record* 430: 1-8.

No obstante lo anterior, las conclusiones no son unánimes, algunos autores como Sakate³⁰² obtuvieron resultados parecidos a los del hormigón de control. Parece ser que las presiones originadas por la formación de hielo pueden canalizarse mejor debido a la mayor porosidad de los áridos reciclados.

Debido a la mayor permeabilidad los hormigones reciclados presentan menor resistencia a la helada. También influye la mayor heladicidad de los áridos reciclados por su mayor absorción, según Sallem³⁰³, Sakate³⁰⁴ y González Fuenteboa³⁰⁵.

Algunos ensayos realizados por el CEDEX presentan resistencias a las heladas similares o ligeramente superiores en el hormigón reciclado, respecto al hormigón convencional. Este mejor comportamiento podría deberse a que la mayor porosidad de los áridos reciclados, que permitiría una mejor distribución de poros, para resistir las presiones generadas por el hielo.

2.4.3.12. Erosión

La erosión del hormigón se produce principalmente por abrasión que produce el desgaste por rozamiento de la superficie del material. Dicho efecto puede tener consecuencias en el comportamiento, bajo las condiciones de servicio, propiciando indirectamente el ataque por alguno de los agentes agresivos considerados en el presente capítulo. La resistencia a la abrasión depende principalmente de la relación agua/cemento, de la calidad de los áridos y de la resistencia a compresión.

Hay que incluir también la posibilidad de la cavitación, que se presenta cuando el agua fluye en contacto con una superficie de hormigón. El flujo de agua puede crear una zona de baja presión, con formación de burbujas de vapor de agua, las cuales al condensar pueden estallar de forma brusca y dañar la superficie.

Hay que tener en cuenta también la acción eólica, que afecta a los elementos situados en los puntos altos y más expuestos de las fachadas (coronaciones aleros etc.). En dichas zonas el viento provoca una acción continua de desgaste que termina por erosionar aquellos elementos.

³⁰² Sakate, K. and Ayano, T. (2000). Improvement of concrete with Recycled Aggregate. C. a. I. C. o. D. Concrete. Barcelona.

³⁰³ Salem, R. and Burdette, E. (1996). "Role of chemical and mineral admixtures on the physical properties and frost resistance of recycled aggregate concrete." *Materials journal* **93**(2): 182-190.

³⁰⁴ Sakate, K. and Ayano, T. (2000). Improvement of concrete with Recycled Aggregate. C. a. I. C. o. D. Concrete. Barcelona.

³⁰⁵ González Fonteboa, B. (2002). Hormigones con áridos reciclados procedentes de demoliciones: Dosificaciones, propiedades mecánicas y comportamiento estructural a cortante. Tesis. E.T.S.I Caminos Canales y Puertos, A Coruña.

Los hormigones reciclados con sustituciones de árido grueso inferiores al 50% no experimentan una disminución apreciable en la resistencia a la erosión según investigaciones realizadas por Limbachiya³⁰⁶ y Dhir³⁰⁷.

2.4.3.13. Carbonatación

Los procesos de carbonatación son muy lentos a causa del bajo contenido en CO₂ de la atmosfera, del orden del 0,04% en volumen, de manera que en hormigones muy densos los efectos de este fenómeno puede no aparecer hasta pasados varios años. La lentitud del proceso ha llevado a los investigadores a realizar estudios acelerados utilizando porcentajes de CO₂ mayores que el atmosférico con el fin simular su comportamiento a largo plazo (Galán³⁰⁸).

En el proceso de carbonatación se produce una reacción química entre el dióxido de carbono (CO₂) contenido en el aire y el hidróxido cálcico (Ca (OH)₂) contenido en la pasta de cemento. La carbonatación comienza en la superficie del hormigón y se propaga lentamente en profundidad. Al colmar los poros, en principio aumenta la resistencia y la durabilidad haciendo las veces de protección natural contra la penetración de gases y líquidos. Sin embargo, es en el hormigón armado donde afecta a las armaduras al disminuir el pH del hormigón circundante y así despasivizar a las armaduras, por lo que su estudio es fundamental.

La carbonatación no presenta diferencias importantes en los hormigones con áridos reciclados. La profundidad de carbonatación apenas aumenta en hormigones con porcentajes de árido reciclado inferiores al 50% con respecto al hormigón de control. Cuando el porcentaje se aproxima al 100% se observan aumentos poco importantes que se mantienen inferiores al 10%.

A igualdad de dosificación, el hormigón reciclado presenta mayor profundidad de carbonatación por el mayor número de poros³⁰⁹.

A igualdad de resistencia a compresión, se observa un mejor comportamiento en los hormigones reciclados. La causa de ello estriba en que en los hormigones reciclados, para obtener una resistencia análoga a la del hormigón de control, la

³⁰⁶ Limbachiya, M. C., Leelawat, T. and Dhir, R. K. (2000). "Use of Recycled concrete Aggregates in High-strength concrete " *Materials and Structures* **33**: 574-580.

³⁰⁷ Dhir, R. K. and Limbchiya (1999). "Suitable of recycled concrete aggregate for use BS 5328 Designated Mixes." *Structures and Building*.

³⁰⁸ Galán, I. (2011). Carbonatación del hormigón combinación del CO₂ con las fase hidratadas del cemento y frente de cambio de pH. *Facultad Ciencias Químicas*. Madrid, Universidad Complutense.

³⁰⁹ Sánchez, M. and Alaejos, P. (2012). Estudio sobre las propiedades del hormigón fabricado con áridos reciclados. *Monografías CEDEX*. M. d. Fomento. Madrid. *Monografías*: 220, *ibid*.

relación agua/cemento del hormigón reciclado ha de reducirse, aumentando el contenido de cemento.

En cuanto a la evolución de la profundidad de carbonatación en el tiempo, los estudios parecen coincidir en que dicha profundidad medida en el hormigón reciclado varía, al igual que en los hormigones convencionales, según una ley parabólica en función del tiempo (ley de Fick (1)).

$$C = K\sqrt{t} \quad (1)$$

Siendo:

C profundidad carbonatada.

K constante que depende de diferentes factores, desde curado, dosificación.

t Tiempo.

La constante K de esta ley depende de muchos factores relacionados con la calidad y resistencia mecánica del hormigón (tipo de cemento, proporción por m^3 de hormigón, relación w/c y de la humedad ambiental. Podemos decir que la humedad óptima de avance del frente se sitúa entre 50% a 80% de humedad relativa. A humedades mayores los poros están saturados de agua y el gas CO_2 , penetra con más dificultad, y a humedades inferiores, los poros están casi secos y el CO_2 no puede reaccionar sin la existencia de un medio líquido.

El hormigón carbonatado presenta unas propiedades diferentes al hormigón no-carbonatado, se observa el aumento de densidad, resistencia, módulo de elasticidad y retracción producidas por la carbonatación y la magnitud de los cambios depende proporcionalmente del contenido de cemento.

La estimación del periodo de iniciación de la carbonatación la podemos realizar según diversos estudios como la EHE-08, CEB-98³¹⁰ o autores como Papadakis³¹¹.

³¹⁰ CEB (1998). Comité Euro-International du Béton. Strategies for testing and Assessments of concrete structures affected by reinforcement corrosion. C. E.-I. d. Béton. Laussane (Suiza), Bulletin 243.

³¹¹ Papadakis, V., Vayena, C. and Fardis, H. (1992). "Fundamental Modeling and Experimental Factors and Cement-lime Mortar Coating on Concrete Carbonation." Materials and Structures **25**: 293-305.

2.4.3.14. Ataque por sulfatos

Se caracteriza por la formación de sulfoaluminato tricálcico que origina un importante aumento de volumen. La reacción química la provoca el ion sulfato al reaccionar con el aluminato de cemento.

El precipitado, denominado etringita, experimenta un aumento de volumen tan importante que puede producir la desintegración del hormigón. La mejor defensa frente a estas acciones consiste en conseguir un hormigón de gran compacidad, la cual permite hacer frente al proceso de deterioro.

Los hormigones reciclados presentan una mayor susceptibilidad a este tipo de ataque por los factores que se exponen a continuación:

- *La presencia de sulfatos que contiene el mortero adherido al árido grueso incorporado al hormigón.*
- *La mayor permeabilidad que presentan los hormigones reciclados facilita la penetración de los sulfatos.*
- *La presencia de partículas de yeso en los áridos procedentes de demoliciones de edificios puede ser muy perjudicial.*

Para evaluar la resistencia del hormigón al ataque por sulfatos, se somete aquel a una solución de sulfato sódico y se determinan los cambios de longitud que experimentan las probetas antes y después del ensayo.

Los hormigones reciclados con un porcentaje de sustitución por debajo del 30%, resisten de forma similar al hormigón convencional. Con porcentajes superiores algunos investigadores Dhir³¹², obtienen incrementos del 52% para sustitución del 50% y 68% cuando la sustitución es total.

Un factor desfavorable es la presencia de sulfatos en los áridos reciclados, procedentes de la pasta de cemento, o por la presencia de impurezas como el yeso, en cuyo caso pueden ser muy perjudiciales para el hormigón.

Los estudios realizados acerca del ataque por sulfatos en hormigones reciclados son escasos, no obstante hay que esperar un comportamiento más desfavorable, por la mayor permeabilidad.

Para estudiar la resistencia a la acción de los sulfatos, se estudia el efecto que una solución de sulfato sódico produce en el hormigón. Los parámetros de

³¹² Dhir, R. K. and Limbchiya (1999). "Suitable of recycled concrete aggregate for use BS 5328 Designated Mixes." Structures and Building.

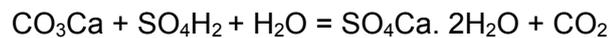
evaluación son el módulo dinámico, cambios de longitud antes y después del ensayo etc.

Con respecto al ataque de sulfato, es evidente que la incorporación de la ceniza volante fina Chindaprasirt³¹³, reduce la expansión de los prismas de mortero sumergidos en la solución de sulfato de sodio.

2.4.3.15. El ataque por ácidos

Existe una pérdida de durabilidad debida a la reacción química que se produce entre los compuestos cálcicos del cemento. Dicha reacción se traduce en la formación de sales cálcicas cuya denominación depende del ácido que actúa:

- *El ácido sulfúrico se transforma en sulfato cálcico, que precipita como yeso.*
- *La reacción del ácido sulfúrico con el carbonato cálcico es la siguiente:*



Investigaciones realizadas demuestran que el ataque de dicho ácido es muy peligroso porque el sulfato generado es un agente destructivo.

El ácido clorhídrico origina cloruro cálcico, que es una sal muy soluble, y provoca la destrucción de la estructura del cemento endurecido.

El ácido nítrico origina nitrato cálcico, que es también muy soluble y por tanto la velocidad de reacción y destrucción del cemento es muy rápida.

2.4.3.16. El ataque por álcalis

Se produce por la presencia de hidróxido cálcico en los poros del hormigón. Dicho compuesto contiene iones de sodio y potasio que tienen capacidad para atacar la sílice contenida en los áridos.

La reacción descrita puede provocar aumentos de volumen que generan importantes deterioros de la estructura del hormigón.

La presencia de árido reciclado puede favorecer dicho tipo de ataque, porque la pasta de cemento adherida aporta álcalis y por la dificultad de control al tratarse de

³¹³ Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S. and 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.

materiales de procedencia diversa. Por ello algunos autores recomiendan la utilización de cementos con bajo contenido de álcalis (Etxeberria³¹⁴).

Hay un acuerdo entre los investigadores, en considerar como factor favorable, la dosificación con una relación agua/cemento baja. En cualquier caso hay que minimizar el tiempo de exposición a los ácidos.

2.4.3.17. Ataque por cloruros

Los hormigones reciclados son más sensibles a la penetración de cloruros, por su mayor permeabilidad. Los cloruros procedentes del agua de mar y de las sales de deshielo en carreteras y puentes de montaña pueden penetrar en el interior del hormigón, combinándose con el cemento para formar la sal de Fridell.

La experimentación existente debida principalmente a Limbachiya³¹⁵, Sakate³¹⁶ muestra que para una sustitución total del árido (árido fino y grueso), el coeficiente de difusión del hormigón reciclado puede duplicar los valores en comparación con el hormigón convencional. Cuando sólo se sustituye árido grueso, los incrementos alcanzan el 30%.

2.5. HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE

El hormigón autocompactante es aquel que como consecuencia de una dosificación adecuada y del empleo de aditivos superplastificantes específicos, se compacta por acción de la gravedad sin precisar medios de compactación externos.

El hormigón autocompactante ha de presentar dos características fundamentales:

- *Alta fluidez y capacidad de relleno: Facilidad de flujo de hormigón fresco dentro del encofrado con garantía de cobertura total de la armadura.*
- *Resistencia a la segregación: La característica anterior debe conservar su composición homogénea en estado fresco.*

Para aunar las dos características anteriores, se recurre por una parte al empleo de aditivos superplastificantes, que incidan sobre la fluidez de la mezcla. Por otra, parte para conseguir una alta resistencia a la segregación, se incrementa la

³¹⁴ Etxeberria, M., Vazquez, E., Mari, A. and Barra, M. (2007). "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete." *Cement & Concrete Composites* **Nº 5**(Vol 37): 735-742.

³¹⁵ Limbachiya, M. C., Leelawat, T. and Dhir, R. K. (2000). "Use of Recycled concrete Aggregates in High-strength concrete " *Materials and Structures* **33**: 574-580.

³¹⁶ Sakate, K. and Ayano, T. (2000). *Improvement of concrete with Recycled Aggregate*. C. a. I. C. o. D. Concrete. Barcelona.

viscosidad de la misma aumentando el contenido de los finos y, eventualmente, mediante el empleo de agentes modificadores e la viscosidad

Debido a su gran capacidad de autoconsolidación, se obtienen hormigones sin coqueas, mucho más impermeables que los tradicionales y con una excelente terminación superficial.

El empleo de hormigón autocompactante en prefabricación está muy extendido. Por el contrario las dosificaciones han de estar más estudiadas difiriendo del hormigón tradicional en que el tamaño máximo de árido ha de ser algo inferior .

El profesor Fernández Cánovas³¹⁷ recomienda dosificación con unas cantidades de cemento de entre 300 y 500 k/m³, contenido de agua de 150 -200 l/m³ y la relación agua/finos entre 0,90 y 1,05, a fin de no tener hormigones excesivamente cohesivos ni fácilmente exudables.

2.5.1. Propiedades hormigón autocompactante

En el hormigón autocompactante pueden emplearse las mismas relaciones entre resistencias medias y características, así como entre resistencias a compresión y tracción, que en hormigones convencionales (Adjukievich³¹⁸).

El comportamiento del hormigón autocompactante puede considerarse similar al de un hormigón convencional, esto es así no solo a nivel de resistencias sino también a efectos de durabilidad y demás prestaciones en estado endurecido (Jiménez Montoya³¹⁹).

La adherencia entre el hormigón y las armaduras suele ser algo superior debido a la mayor densidad del hormigón en contacto con las barras, lo que permite considerar las mismas longitudes de anclaje que en los hormigones convencionales de igual resistencia.

El módulo de deformación del hormigón autocompactante depende del contenido de áridos. Si este contenido es alto (entre 65%-70%) puede considerarse que el módulo de deformación será equivalente al de un hormigón tradicional; pero si es bajo (menos del 65%) el módulo será menor debido al mayor volumen de pasta, cuyo módulo de elasticidad es menor que el de los áridos.

³¹⁷ Fernández Cánovas, M. (2006). Hormigón Armado, Madrid.

³¹⁸ Ajdukiewicz, A. and Kliszczewicz, A. (2002). "Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC." *Cement & Concrete Composites* **24**(2): 269-279.

³¹⁹ Jiménez Montoya (2009). Hormigón Armado. Madrid.

La retracción puede considerarse equivalente a la del hormigón tradicional, si bien puede ser algo mayor debido al mayor contenido de finos que aumenta el volumen de pasta.

2.5.2. Resumen de los estudios realizados en hormigones autocompactantes

A continuación, se recogen en la Tabla 16 diversos estudios de hormigones estructurales autocompactantes con incorporación de áridos naturales y reciclados.

Para mejor comprensión se adjunta la leyenda de los encabezados:

Leyenda: **Tamaño G-F** Grueso o fino. **W:** Trabajabilidad. **H-M:** Árido hormigón o mixto. **D:** Durabilidad **PI:** Prueba industrial. **Itz:** interfase. **Fly ash:** Cenizas volantes. **f_c:** Resistencia compresión. **f_{ct}:** Resistencia a tracción. **f_{flex}:** Resistencia a flexión. **E:** Módulo elasticidad. **Ab:** abrasión resistencia **H:** Hielo deshielo. **R:** Retracción, **HS:** Humo sílice. **SP:** Superplastificante. **F:** Refuerzo fibras acero. **M:** Reciclados mármol **P:** Permeabilidad. **R:** Retracción. **w/c:** Relación agua/cemento (**V:** Varias).

Tabla 16 Relación autores con estudios referentes a hormigones autocompactantes con áridos reciclados.

Relación autores estudios propiedades autocompactante													
AÑO	AUTOR	Árido	Tamaño	Prop. Mec.							D	w/c	
		H-M	G-F	P	W	f _c	f _{ct}	f _{flex}	E	PI			
2002	Ajdukievich, A. ³²⁰	H	x	x	x	x	x			x	H	x	.4-.5
2004	Corinaldesi, Morricone ³²¹	H	x	x	x	x	x						V
2006	Tsung-Yueh T et al. ³²²	H	x		x	x					Cl-		V
2009	Shen, Y. et al. ³²³	H	x			x	x						V
2009	Kou and Poon. ³²⁴	H	x-x	x	x	x	x					R	.3-.5
2010	Grdic, Z. et al. ³²⁵	H	x	x	x	x							0.42
2010	Bermejo, E. et al. ³²⁶	H	-	x		x						R	V
2011	Corinaldesi and Moriconi ^{327 328}	H	x-x	x	x	x				x			0.45

³²⁰ Ajdukiewicz, A. and Kliszczewicz, A. (2002). "Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC." *Cement & Concrete Composites* 24(2): 269-279.

³²¹ Corinaldesi, V. and Moriconi, G. (2004). "Influence of minerals additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete." *Construction and Building Material* 23: 2869-2873.

³²² Tsung-Yueh Tu, Y.-Y. C., Chao-Lung Hwang (2006). "Properties of HPC with recycled aggregates." *Cement and Concrete Research* 36(5): 943-950.

³²³ Shen, J., Yurtdas, I., Diagana, C. and Li, A. (2009). "Mix-design method of self-compacting concretes for pre-cast industry." *Canadian Journal of Civil Engineering* 36(9): 1459-1469.

³²⁴ Kou, S. C. and Poon, C. S. (2009). "Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates." *Cement and Concrete Composites* 31(9): 622-627.

³²⁵ Grdic, Z. J., Toplicic-Curcic, G. A., Despotovic, I. M. and Ristic, N. S. (2010). "Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate." *Construction and Building Materials* 24(7): 1129-1133.

³²⁶ Bermejo, E., J.Galvez and FERNANDEZ CANOVAS, M. (2010). Retraccion y fluencia de hormigon autocompactante de resistencia moderada, 2º Congreso Iberico sobre Hormigon Autocompactante. Guimaraes

³²⁷ Corinaldesi, V. and Moriconi, G. (2011). "The role of industrial by-products in self-compacting concrete." *Construction and Building Materials* 25(8): 3181-3186.

³²⁸ Polvo de escombros

Relación autores estudios propiedades autocompactante													
AÑO	AUTOR	Árido		Tamaño			Prop. Mec.					D	w/c
		H-M	G-F	P	W	f _c	f _{ct}	f _{flex}	E	PI			
2011	Li, J. et al. ³²⁹	H	x			x							V
2012	Li, J. et al. ³³⁰	H	x			x					X		V
2012	Yuan, Y. et al. ³³¹	H											V
2012	Uysal, M. ³³²	H	-	-		x							0.35
2012	Hui Zhao W.S. et al. ³³³	H	-	x	x	x						x	0.4
2013	Panda and Bal ³³⁴	H	x		x	x	x	x					0.34
2013	Tang, W. ³³⁵	H	x	x	x								0.3
2013	Pereira-de Oliveira, et al. ³³⁶	H	x	x	x	x	x	x					V
2013	Siddique, R. ³³⁷ (cenizas carbón)	-	-	x	x	x						x	V
2014	Kebai"li, O. et al. ³³⁸	H	x	x	x	x						itz	0.35
2014	Khafaga S.A et al. ³³⁹ (SP)	H	x-x	x		x							0.3
2014	Liu H. et al. ³⁴⁰	M	x	x	x	x							V
2014	Modani and Mohitka ³⁴¹	H	x	P		x							V
2014	Pereira de Oliveira et al. ³⁴²	H	x	x		x						x	0.57
2014	Said, K. et al. ³⁴³	H	x-x	x	x	x						x	V
2014	Seethapathr, M. et al. ³⁴⁴	H	x	x	x	x	x	x					V

³²⁹ Li, J., Qu, X., Wang, L. and Zhu, C. (2011). Experimental research on compressive strength of self-compacting concrete with recycled coarse aggregates. *Advanced Materials Research*. **306-307**: 1084-1087.

³³⁰ Li, J., Qu, X., Chen, H. and Jiang, L. (2012). Experimental research on mechanical performance of self-compacting reinforced concrete beam with recycled coarse aggregates. *ibid.* **374-377**: 1887-1890.

³³¹ Yuan, Y., Takao, U. and Yu, C. *Ibid.* SCC produced with recycled concrete aggregates. **512-515**: 2986-2989.

³³² Uysal, M. (2012). "The influence of coarse aggregate type on mechanical properties of fly ash additive self-compacting concrete." *Construcción and Building Material* 37: 53-540.

³³³ Hui Zhao, W. S., Xiaoming Wub, Bo Gao (2012). "The effect of coarse aggregate gradation on the properties of self-compacting concrete." *Materiales & Design*. 40: 109-116.

³³⁴ Panda, K. C. and Bal, P. K. (2013). Properties of self compacting concrete using recycled coarse aggregate. *Procedia Engineering*.

³³⁵ Tang, W. (2013). Fresh properties of self-compacting concrete with coarse recycled aggregate. *Advanced Materials Research*. 602-604: 938-942.

³³⁶ Pereira-de-Oliveira, L. A., Nepomuceno, M. C. S., Castro-Gomes, J. P. and Vila, M. F. C. (2014). "Permeability properties of self-compacting concrete with coarse recycled aggregates." *Construction and Building Materials* **51**: 113-120.

³³⁷ Siddique, R. (2013). "Compressive strength, water absorption, sorptivity, abrasion resistance and permeability of self-compacting concrete containing coal bottom ash." *Ibid.* 47: 1444-1450.

³³⁸ Kebai"li, O., Mouret, M., Arabi, N. and Cassagnabere, F. (2014). "Adverse effect of the mass substitution of natural aggregates by air-dried recycled concrete aggregates on the self-compacting ability of concrete: Evidence and analysis through an example." *Journal of Cleaner Production*.

³³⁹ Khafaga, S. A. (2014). "Production of high strength self compacting concrete using recycled concrete as fine and/or coarse aggregates." *World Applied Sciences Journal* 29(4): 465-474.

³⁴⁰ Liu, H. Q., Liu, Y. L. and Gao, L. (2014). Experimental studies on the influence of gradation of recycled coarse aggregates to the strength of self-compacting concrete. *Applied Mechanics and Materials*. **513-517**: 169-172.

³⁴¹ Modani, P. O. and Mohitkar, V. M. (2014). "Performance of recycled aggregates in self compacting concrete." *Indian Concrete Journal* **88**(10): 57-64.

³⁴² Pereira-de-Oliveira, L. A., Nepomuceno, M. C. S., Castro-Gomes, J. P. and Vila, M. F. C. (2014). "Permeability properties of self-compacting concrete with coarse recycled aggregates." *Construction and Building Materials* **51**: 113-120.

³⁴³ Said, K., Belkacem, M., Amina, D. and El-Hadj, K. (2014). Effect of recycled concrete aggregates and natural pozzolana on rheology of self-compacting concrete. *Key Engineering Materials*. **600**: 256-263.

Relación autores estudios propiedades autocompactante												
AÑO	AUTOR	Árido		Tamaño				Prop. Mec.				
		H-M	G-F	P	W	f _c	f _{ct}	f _{flex}	E	PI	D	w/c
2014	Song and Ryou ³⁴⁵	H	x					x	x			V
2014	Nalanth, N. et al. ³⁴⁶	H	x	x	x	x	x	x		x		0.35
2014	Uygunoğlu, T. et al. ^{347(M)}	H	x		x	x	x	x	x			.3-4
2014	Wang, J. et al. ³⁴⁸	H	x		x				x		x	V
2014	Yu, J.J. et al. ³⁴⁹	H	x		x	x	x	x				V
2014	Güneyisi, E. et al. ³⁵⁰	H	x	x	x	x	x	x			itz	0,38
2014	Khafaga, S.A. et al. ³⁵¹	H	x-x	x		x	x	x				V
2015	Güneyisi, et al. ³⁵²	H	x	x	x							V
2015	Xie, Y. et al. ³⁵³											V
2014	Kebai'li, O. et al. ³⁵⁴	H	x	x	x							0,3
2015	Gupta, V. et al. ^{355 (HS)}	H	x-x	x	x	x	x				x	V

Leyenda: **Tamaño G-F** Grueso o fino. **W:** Trabajabilidad. **H-M:** Árido hormigón o mixto. **D:** Durabilidad **PI:** Prueba industrial. **itz:** interfase. **Fly ash:** Cenizas volantes. **f_c:** Resistencia compresión. **f_{ct}:** Resistencia a tracción. **f_{flex}:** Resistencia a flexión. **E:** Módulo elasticidad. **P.fis:** Propiedades físicas (densidad, Absorción) **Ab:** abrasión resistencia **R:** Retracción **H:** Hielo deshielo **R:** Retracción, **HS:** Humo sílice. **SP:** Superplastificante. **F:** Refuerzo fibras acero. **M:** Reciclados mármol. **P:** Permeabilidad. **w/c:** Relación agua/cemento (**V:** Varias).

³⁴⁴ Seethapathi, M., Senthilkumar, S. R. R. and Chinnaraju, K. (2014). "Experimental study on high performance self-compacting concrete using recycled aggregate." *Journal of Theoretical and Applied Information Technology* **67**(1): 84-90.

³⁴⁵ Song, I. H. and Ryou, J. S. (2014). "Hybrid techniques for quality improvement of recycled fine aggregate." *Construction and Building Materials* **72**: 56-64.

³⁴⁶ Nalanth, N., Venkatesan, P. V. and Ravikumar, M. S. (2014). "Evaluation of the fresh and hardened properties of steel fibre reinforced self-compacting concrete using recycled aggregates as a replacement material." *Advances in Civil Engineering* **2014**.

³⁴⁷ Uygunoğlu, T., Topçu, I. B. and Çelik, A. G. (2014). "Use of waste marble and recycled aggregates in self-compacting concrete for environmental sustainability." *Journal of Cleaner Production*.

³⁴⁸ Wang, H. C., Wang, X. H. and An, X. H. (2014). The comparison of self-compacting rock-filled concrete with large-size natural and recycled aggregate. *Applied Mechanics and Materials*. **513-517**: 20-23.

³⁴⁹ Yu, J. J., Gong, J., Zou, J. M. and Yang, W. K. Ibid. Study on properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate. **638-640**: 1494-1498.

³⁵⁰ Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Booya, E. and Mermerdaş, K. (2015). "Strength and permeability properties of self-compacting concrete with cold bonded fly ash lightweight aggregate." *Construction and Building Materials* **74**: 17-24.

³⁵¹ Khafaga, S. A. (2014). "Production of high strength self-compacting concrete using recycled concrete as fine and/or coarse aggregates." *World Applied Sciences Journal* **29**(4): 465-474.

³⁵² Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Booya, E. and Mermerdaş, K. (2015). "Strength and permeability properties of self-compacting concrete with cold bonded fly ash lightweight aggregate." *Construction and Building Materials* **74**: 17-24.

³⁵³ Xie, Y., Corr, D. J., Jin, F., Zhou, H. and Shah, S. P. (2015). "Experimental study of the interfacial transition zone (ITZ) of model rock-filled concrete (RFC)." *Cement and Concrete Composites* **55**: 223-231.

³⁵⁴ Kebai'li, O., Mouret, M., Arabi, N. and Cassagnabere, F. (2015). "Adverse effect of the mass substitution of natural aggregates by air-dried recycled concrete aggregates on the self-compacting ability of concrete: Evidence and analysis through an example." *Journal of Cleaner Production*.

³⁵⁵ Gupta, S., Varshney, N., Upadhyay, J., Mullick, A. K. and Murari, K. (2015). "An experimental study on self-compacting concrete with aggregates from waste material." *Indian Concrete Journal* **89**(2): 39-48.

*CARACTERIZACIÓN DE
MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL*

CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1. OBJETIVOS

La finalidad de este capítulo es la exposición de la metodología experimental empleada, tomando como base a una empresa del sector del prefabricado, con el fin de realizar mediante este trabajo nuevos hormigones con áridos reciclados provenientes de los productos rechazados, tanto en los controles en las instalaciones de producción de elementos prefabricados de hormigón como elementos que difieren de las dimensiones establecidas o componentes de obras prefabricadas que no han sido utilizados. En resumen el objetivo es de estudiar la viabilidad de la incorporación de dichos productos nuevamente al ciclo productivo para generar nuevos elementos de hormigón armado y/o pretensado.

Para ello se analizan los materiales intervinientes en los nuevos hormigones además de detallar como es la obtención del árido reciclado. Los áridos procedentes de piezas prefabricadas presentarán unas elevadas prestaciones como consecuencia del control de calidad establecido en las factorías. Debido a dicha circunstancia se presume viable su utilización en hormigones estructurales.

Para lograr dicho objetivo se analizarán los materiales, su procedencia, se dictarán las bases de diseño de las nuevas dosificaciones, se planificarán los ensayos necesarios y se expondrán las técnicas experimentales para llevarlos a cabo con éxito. Los resultados de esta planificación y sus correspondientes ensayos aparecerán detallados en el Capítulo 4 Resultados y Análisis de la presente Tesis.

Como ya se expuso en el Capítulo 2, se llevaron a cabo visitas a una serie de plantas de tratamiento de RCD y a varias empresas de prefabricados ubicadas en la provincia de Burgos, pudiéndose apreciar que existe un importante potencial en la generación y gestión de residuos. Es preciso desarrollar este potencial por el importante ahorro en materia prima y tasas de vertido que podrán conseguirse cuando se reactive la actividad económica tras la crisis actual.

Este trabajo se puede desarrollar gracias a la colaboración entre la Universidad de Burgos y la empresa “**Grupo Gerardo de la Calle**” mediante un convenio marco suscrito entre ambas partes y en el que su cláusula principal expone:

“El presente Convenio Marco tiene el objeto de establecer el entorno de referencia para la acción coordinada entre las Partes, tanto sobre el intercambio de información,

como sobre el desarrollo de aquellas actuaciones encaminadas a potenciar la **investigación científica y la innovación tecnológica** como elementos básicos para la modernización, competitividad y productividad”.

El grupo de empresas de Gerardo de la Calle en Aranda de Duero tiene diversificada su actividad en las siguientes facetas:

- *Hormigones en general (suministro en planta).*
- *Maquinaria para la obra pública.*
- *Áridos y mezclas bituminosas.*
- *Forjados y elaboración de ferralla.*
- *Prefabricados de hormigón no estructural (bloques, bovedillas, bordillos, otros elementos complementarios).*
- *Prefabricados de hormigón estructural para edificación y naves (elementos de entramado, paneles de cerramiento, etc.).*
- *Planta de reciclaje.*

3.1.1. Elementos prefabricados estructurales

La aplicación que supone el presente estudio, será viable en aquellos elementos pertenecientes a empresas de prefabricados que elaboren hormigón estructural en elementos resistentes con aplicación fundamental a la edificación, naves industriales fundamentalmente.

Las aplicaciones directas más usuales en edificación de elementos prefabricados son:

- Placas alveolares para forjados.
- Viguetas prefabricadas para forjados.
- Vigas o jácenas para forjado y cubierta.
- Pilares prefabricados.
- Paneles autoportantes para edificación.
- Vigas de cubierta.
- Correas para cubierta.
- Depósitos de hormigón prefabricado.
- Viviendas modulares.

En la Fig. 21 se exponen algunos ejemplos de ellos.



Fig. 21 Diversos productos prefabricados en hormigón estructural.

En la Fig. 22 se adjuntan algunas obras de edificación en las se utilizan diversos elementos prefabricados. El estudio pretende analizar el proceso de recuperación de dichas piezas procedentes de la factoría de prefabricados “ARTEPREF” perteneciente al grupo de empresas “Gerardo de la Calle” en Aranda de Duero (Burgos).



Fig. 22 Elementos prefabricados de vigas, pilares y forjados (foto izquierda), elementos prefabricados de cubiertas de gran luz (foto centro) y paneles prefabricados de naves (foto derecha).

Los elementos prefabricados son el origen del nuevo árido reciclado que formará parte del hormigón que se fabrique para el autoconsumo y cuya producción podrá tener lugar entre otras posibilidades, en la propia central de tratamiento de residuos que la empresa posee, obteniéndose un árido de muy buena calidad y sin contaminación por agentes exteriores.

La naturaleza de los áridos inicialmente empleados se describe a continuación de manera simplificada:

Árido de coloración versicolor en el que predominan los tonos blanquecinos y ocre sobre los rojizos y grises. La clase se puede denominar: cantos y arenas. En cuanto a la forma, en general tiende a presentar formas de redondeadas a subredondeadas de baja esfericidad. Algunos cantos presentar recubrimientos externos que reaccionan con efervescencia con el ácido clorhídrico. No se observan restos de fósiles y provienen de un ambiente geológico sedimentario. Su

clasificación, en definitiva, se puede definir como cantos y arenas cuarcítico y carbonatados.

El árido así obtenido de los hormigones triturados, conservara en parte su carácter redondeado, y parte resultará anguloso tras el fraccionamiento después de la trituración en la producción del árido reciclado.

3.1.2. Metodología de las actuaciones

Para la obtención de un nuevo elemento prefabricado estructural, en el cual hayamos incorporado árido reciclado proveniente de los rechazos de otros elementos prefabricados, debemos seguir una secuencia consistente en las siguientes fases.

- I. Una primera fase consistente en la obtención del árido reciclado.*
- II. Una segunda fase de estudio de todos los componentes que van a formar parte del nuevo hormigón, incluido el árido reciclado, cuya caracterización será fundamental.*
- III. Una tercera fase en la cual, teniendo en cuenta las materias primas antes descritas, se diseñe una dosificación similar a la empleada en la fabricación de hormigones destinados a los elementos prefabricados de la gama de productos. Para validar esto último, se llevará a cabo una campaña experimental, lo más completa posible, que demuestre la idoneidad y proporcione las propiedades, tanto mecánicas como físicas y de durabilidad, que se llevará a cabo en los laboratorios de materiales e ingeniería civil de la Universidad de Burgos.*
- IV. La cuarta fase y última se llevará a cabo realizando una campaña de ensayos en la propia factoría de prefabricados (ARTEPREF), utilizando todos los parámetros y medios empleados habitualmente en la elaboración de piezas de elementos prefabricados, abarcando prácticamente toda la gama productiva.*

3.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES EMPLEADOS

3.2.1. Procedencia y obtención del árido reciclado

En el presente estudio se utilizan los materiales que van a ser incorporados a los nuevos hormigones serán los procedentes de piezas prefabricadas no aprovechables, por obras no ejecutadas, no conformidades, error en la geometría o procedentes de restos sobrantes del hormigonado diario, Fig. 23. El estudio se aplica al proceso de recuperación de dichas piezas procedentes de la factoría de prefabricados “**ARTEPREF**” perteneciente al grupo de empresas “Gerardo de la Calle” en Aranda de Duero (Burgos). El volumen de residuos que la empresa genera, supone entre un 1% y un 3% del volumen de hormigón generado. Lo que supone una tasa de regeneración al año de aproximadamente entre 350-750 m³ de hormigón, dependiendo de la producción.



Fig. 23 Almacén de productos prefabricados rechazados.

En la Tabla 17 se especifica el porcentaje de elementos prefabricados existentes en el almacén de productos rechazados.

Tabla 17 Elementos prefabricados utilizados y grado de porcentaje de desecho sobre el total.

Elementos prefabricados ³⁵⁶	Desecho total (% Volumen)
Vigas L y T pretensadas HPAC-45* y vigas tipo delta HPAC-50*	20
Correas Dallas pretensadas HPAC-40*	15
Pilares prefabricados armados HAC-40*	20
Paneles prefabricados armados HAC-30*	40
Otros	5

³⁵⁶ HPAC-40, HPAC-45, HPAC-50 Hormigón autocompactante pretensado de resistencia característica 40-45-50 MPa respectivamente y HAC-40, HAC-30 Hormigón autocompactante armado de resistencia característica 30 MPa

Existen también residuos producidos, por restos de amasadas sobrante que se producen en los días de hormigonado. En la Tabla 18 se muestran las dosificaciones por metro cúbico y las principales propiedades (proporcionadas por el fabricante) de los distintos hormigones endurecidos con los que se fabrican los elementos prefabricados.

Tabla 18 Dosificaciones tipo y propiedades de los hormigones utilizados.

TIPO ³⁵⁷	Arena sílicea 0/2 (kg)	Grava sílicea 2/12,5 (kg)	Filler calizo (kg)	Cemento I-52,5 (kg)	Sika 20HE (g) (*)	Sika 5920 (g) (*)	Densidad (t/m ³)	f _{cm} (^{**}) (28D) MPa
HAC-30	650	1150	310	250	1090	560	2,32	38
HPAC-40	650	1150	290	300	1150	730	2,38	49
HPAC-45	650	1150	270	320	1310	730	2,39	53
HPAC-50	650	1150	270	330	1310	730	2,39	57

(*) Los aditivos empleados poseen pH<9, el contenido de cloruros está por debajo de los límites permitidos.

(**) f_{cm} valores medios de resistencia a compresión aportados por el fabricante extraídos del autocontrol.

La edad media de los hormigones de estas piezas es de cuatro años, existiendo en el almacén elementos prefabricados de mayor edad.

Las dosificaciones empleadas son todas de hormigón autocompactante ya que todos los elementos prefabricados que produce la empresa se vierten en moldes y no se compactan con métodos de vibrado.

A partir de estos elementos se ha de optar por dos caminos para la obtención del AR, uno de ellos es el utilizar la central de tratamientos de residuos existente, tal y como se ha expuesto en el Capítulo 2 Apartado 2.2.3.5, proceso al que se debe añadir la trituración ya que la planta está dedicada solamente a la clasificación de cualquier tipo de residuo, y únicamente puede utilizarse en la fase final de clasificación y posible cribado. Y el otro camino es el realizarlo en una central de residuos externa y próxima a la factoría.

Por proximidad, se gestiona en empresa Arpape S.L.³⁵⁸, sita también en Aranda de Duero y situada cerca de las instalaciones del Grupo Gerardo de la Calle. Para ello el proceso se divide en las siguientes fases:

³⁵⁷ HAC : hormigón armado autocompactable. HPAC: Hormigón pretensado autocompactable.

- Transporte del material prefabricado en camión hasta la planta de trituración (Fig. 24).
- La trituración primaria de las piezas se realiza mediante pinza hidráulica para poder eliminar las armaduras, obteniéndose un tamaño entre 0/300 mm (Fig. 25).



Fig. 24 Transporte a la planta de residuos para su trituración.



Fig. 25 Pinza hidráulica utilizada para eliminar armaduras y extraer los residuos de tamaño aproximadamente de hasta 150 mm para procesar en machacadora.

- A continuación se realiza una primera trituración mediante machacadora de mandíbulas en la cual la distancia entre mandíbulas reduce el árido a un tamaño máximo de 80 mm (Fig. 26).

³⁵⁸ Arpape S.L. Empresa con ámbito en varias actividades como movimiento de tierras, tratamientos de áridos, que posee medios adecuados para la trituración y demolición.



Fig. 26 Proceso de obtención de árido reciclado hasta un tamaño de 0/80 mm.

- Posteriormente, el árido resultante del proceso anterior, se procesa en un molino de impacto para reducir el tamaño a 0/25 mm (Fig. 27).



Fig. 27 Proceso final reducción en molino de impactos hasta tamaño 0/25 mm.

En esta investigación solo se utilizará la fracción gruesa hasta 12,5 mm (fracción 4/12,5) adecuada para un hormigón autocompactante³⁵⁹, con un aprovechamiento del tamaño 4/12,5 del orden del 65%, algo más bajo que el habitual que está comprendido entre el 70%-90%. Si bien los tamaños entre 12,5/25 mm pueden ser recuperados al incorporarlos a una nueva trituración.

En la Fig. 28 se muestra el cribado manual realizado en el laboratorio para la obtención del árido de 4/12,5 mm.

De cara a una mayor optimización en un futuro, una vez comprobada la validez del presente estudio, y además aprovechando la actual central de residuos que el grupo de empresas que Gerardo de la Calle posee, el incorporar una trituradora móvil o una trituradora fija completaría el proceso evitando trasladar los residuos a otra planta externa.

³⁵⁹ En el estado del arte se expusieron las recomendaciones para la elaboración de un hormigón autocompactante que recomiendan limitar el tamaño máximo del árido en 12,5 mm.



Fig. 28 Sacas de árido reciclado tamaño 0/25 mm (Foto izquierda) y cribado manual a tamaño 4/12,5 mm (Foto derecha).

En la Fig. 29 se expone una propuesta de la incorporación de una trituradora en la cabecera de la central de residuos que de servicio al resto de instalación existente. Se considera completa y eficiente para poder obtener mediante separación y cribado cualquier tipo de árido reciclado procedente de elementos prefabricados rechazados o incluso, como ampliación del estudio, con áridos procedentes de otras estructuras de hormigón.



Fig. 29 Propuesta organización añadiendo una trituradora móvil en el proceso, tamizado (tromel), triaje, etc. y posteriormente acopiarlo.

La obtención del AR a partir de la propuesta planteada resulta:

- Un producto resultante del rechazo por calidad: ARgc (árido reciclado Artepref Grupo Gerardo Calle).
- Productos resultantes de demolición de estructuras de hormigón procedentes de demoliciones de edificios: ARrec (árido reciclado genérico).

3.2.2. Caracterización del árido reciclado

Para la caracterización de los áridos reciclados provenientes de la planta de Artepref se realizarán los correspondientes ensayos según los procedimientos preceptivos.

Para el árido reciclado se combinarán los ensayos en el propio laboratorio, que la empresa posee, con los realizados en los laboratorios de la Escuela Politécnica Superior de San Amaro, de la Universidad de Burgos, realizándose las actuaciones que se exponen a continuación:

3.2.2.1. Granulometría de los áridos

La determinación de la granulometría del AR se realizó conforme a la Norma UNE-EN 933-1³⁶⁰. Se toman varias muestras a unas se les practicó un tamizado por lavado previo y posterior secado y a otras no se les realizó ningún proceso de lavado con el fin de comprobar la posible variación de la fracción fina.

En la Fig. 30 se muestra los resultados de las granulometrías del árido reciclado obtenido. En España no existe ninguna especificación que articule valores máximos o mínimos de los tamaños correspondientes a la granulometría del árido grueso para su empleo en hormigón, pero sí es conveniente tener en cuenta los límites de la ASTM-33³⁶¹ que se representa en Fig. 30 para un tamaño máximo 12,5 mm.

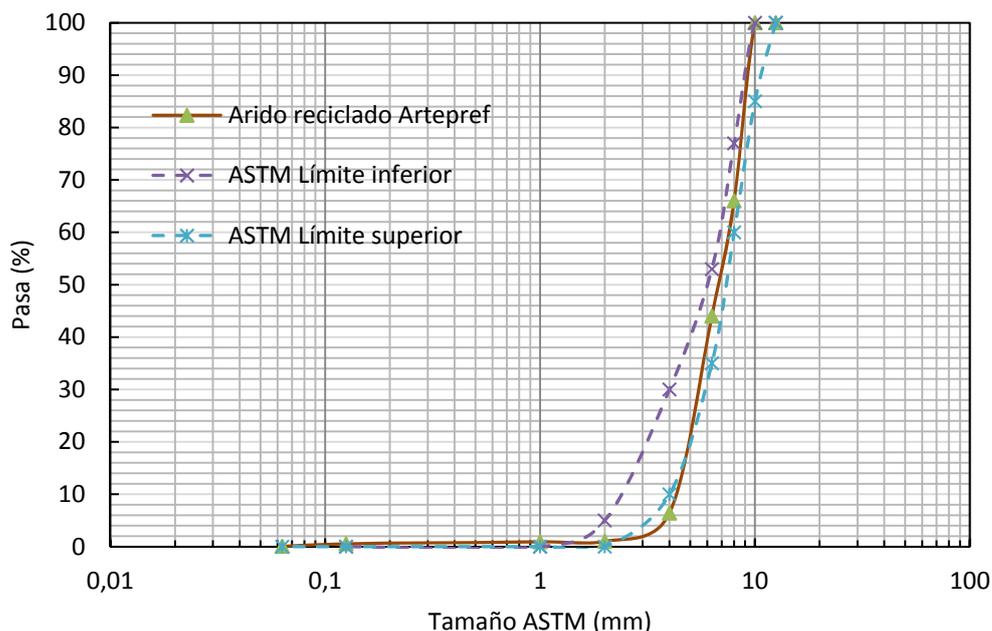


Fig. 30 Gráfico comparativo árido reciclado con límites ASTM C33 para una graduación de 12,5 mm.

Los resultados obtenidos se ajustan a las exigencias de la EHE, presentando un contenido de desclasificados inferiores menor o igual al 10% y un contenido de

³⁶⁰ UNE-EN-933-1 (2006). Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos Parte 1 Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.

³⁶¹ ASTM-33-08 (2008). Standar specification for concrete aggregates. S. Coshohoken. USA.

partículas que pasan por el tamiz de 4 mm no superior al 5%. En todos los casos cumplen con lo especificado.

La clasificación del árido reciclado resultante atendiendo a la EHE-08 se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19 Designación y categoría áridos utilizados atendiendo a la EHE-08.

Material	d/D	Módulo	Categoría-Designación
Árido reciclado	4/12,5	6,60	G _c 90/15 (AG T 4/12,5 R)

En general el árido reciclado procedente de hormigones de mayor resistencia presenta módulos granulométricos ligeramente superiores respecto a los procedentes de hormigones menos resistentes³⁶².

3.2.2.2. Determinación del porcentaje de finos

La determinación de porcentaje de finos, que pasan por el tamiz 0,063 mm se realiza de acuerdo con la Norma UNE-EN 933-1³⁶³.

En la Tabla 20 siguiente se recoge la cantidad de finos, en porcentaje, resultante de la media de las dos muestras ensayadas.

Tabla 20 Cantidad de finos que pasan por el tamiz 0,063 mm.

Cantidad de finos que pasan por el tamiz 0,063 UNE-EN933-2M:1999	%
Media AR	0,41

La Instrucción EHE-08 limita el contenido de finos al 1% del árido grueso. Los valores resultantes de las dos muestras se encuentran por debajo del límite del 1%. Los finos obtenidos son consecuencia de la manipulación y debidos a la mayor friabilidad de la pasta de cemento adherida.

3.2.2.3. Coeficiente de forma

Para la determinación del coeficiente de forma se seguirán las pautas indicadas en la norma UNE-EN 933-4³⁶⁴.

³⁶² Sánchez, M. (2004). Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. Tesis. Departamento de Ingeniería Civil. Madrid, ETS Caminos Madrid: 474.

³⁶³ UNE-EN-933-1 (2006). Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos Parte 1 Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.

³⁶⁴ UNE-EN-933-4 (2006). Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos Parte 4 Determinación de la forma de las partículas. Coeficiente de forma.

El ensayo consiste en la clasificación de las partículas unitarias de una muestra de árido grueso según su relación entre la longitud “l” y su grosor “e”. El coeficiente de forma se calcula como la masa de las partículas con una relación “l/e” superior a 3, expresada en forma de porcentaje de la masa total en seco de las partículas ensayadas con la siguiente expresión:

$$I = \frac{M_2}{M_1} \times 100 \quad (2)$$

Donde M_1 es la masa de la muestra de ensayo y M_2 la masa de partículas, con $l/e > 3$ no cúbicas, ambas expresadas en gramos Fig. 31.



Fig. 31 Separación por tamaños y partículas con relación especificada fuera de rango.

Los resultados de los ensayos del coeficiente de forma, para dos fracciones diferentes y una media ponderada, se incluyen en la Tabla 21.

Tabla 21 Resultados del ensayo para obtener el coeficiente de forma.

Fracción granulométrica ensayada	Coficiente de forma (% peso)
Muestra 1 (AR 8/12,5)	2,10
Muestra 2 (AR 4/8)	2,40
Media	2,25

La Fig. 32 muestra las fracciones de la muestra ensayada y las partículas no cúbicas para las dos distintas fracciones consideradas.



Fig. 32 Fracciones 4/8 y 8/12,5 mm obtenida después del ensayo.

La instrucción EHE-08 indica que el coeficiente de forma del árido grueso no debe ser inferior al 0,20, quedando todas las muestras ensayadas por encima de los mínimos exigidos.

3.2.2.4. Determinación del índice de lajas

Si bien el coeficiente de forma del árido reciclado proporciona información acerca de la forma, el índice de lajas es un método de determinación de la esbeltez del árido.

Este último parámetro se determina de acuerdo con el procedimiento indicado en la norma UNE-EN 933-3³⁶⁵. En la Fig. 33 se muestra los diferentes tamices de barras, que seleccionan los distintos tamaños de abertura.

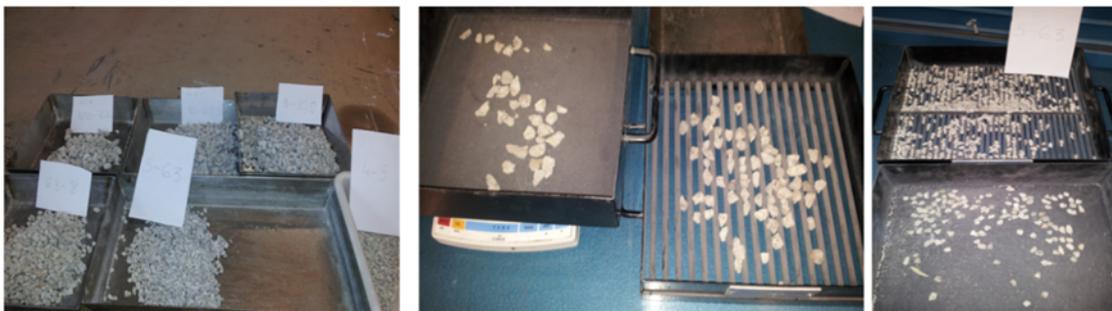


Fig. 33 Procedimiento de índice lajas donde se muestra los diferentes tamices de barras y el resultado por tamaños.

El ensayo se realiza únicamente sobre partículas cuyos tamaños estén comprendidos entre 4 y 80 mm, descartándose todas las demás. Para ello, se dividen las muestras por tamizado en un conjunto de fracciones granulométricas d_i/D_i (tamaño mínimo/tamaño máximo), de tal forma que se pesan y se rechazan aquellas

³⁶⁵ UNE-EN-933-3 (2006). Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos Parte Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas.

partículas cuyos tamaños sean menores de 4 mm o superiores a 80 mm; esta cantidad de árido constituye el llamado total de masa rechazada.

Una vez obtenidas y pesadas todas las fracciones granulométricas especificadas, se criba cada una de ellas de forma manual durante 1 minuto utilizando el tamiz de barras correspondiente en cada caso, que es aquel cuya separación entre las barras es precisamente igual a $D_i/2$, y se pesa la cantidad de árido de cada fracción que pasa a través de dicho tamiz.

De esta forma, se calcula el índice de lajas (IL) para cada fracción granulométrica, definido en porcentaje como la relación entre el peso de árido reciclado que pasa por el tamiz de barras correspondiente (P_2) y el peso inicial (P_1) de cada una de las fracciones (3):

$$IL = \frac{P_2}{P_1} \times 100 \quad (3)$$

Se define entonces el índice de lajas global (IL global) como la relación entre los sumatorios de dichas masas para todas las fracciones consideradas, expresando el resultado redondeado al número entero más próximo. La Tabla 22 recoge los resultados obtenidos.

Tabla 22 Índice de lajas para el AR.

Tamiz (d/D)	D/2	Índice de lajas (% peso)
12,5/16	8	11,67
10/12,5	6,3	7,41
8/10	5	8,49
6,3/8	4	6,52
5/6,3	3,15	7,79
4/5	2,5	7,11
Total		7,88

El resultado del índice de lajas total, atendiendo al Artículo 28.5 de la actual EHE-08 deberá ser menor de 35% por lo que queda holgadamente dentro de los límites.

El AR estudiado presenta valores proximos a los mínimos consultados en el Estado del Arte e incluso por debajo de otros estudios con áridos procedentes de prefabricados (Norten PH) (Fig. 34).

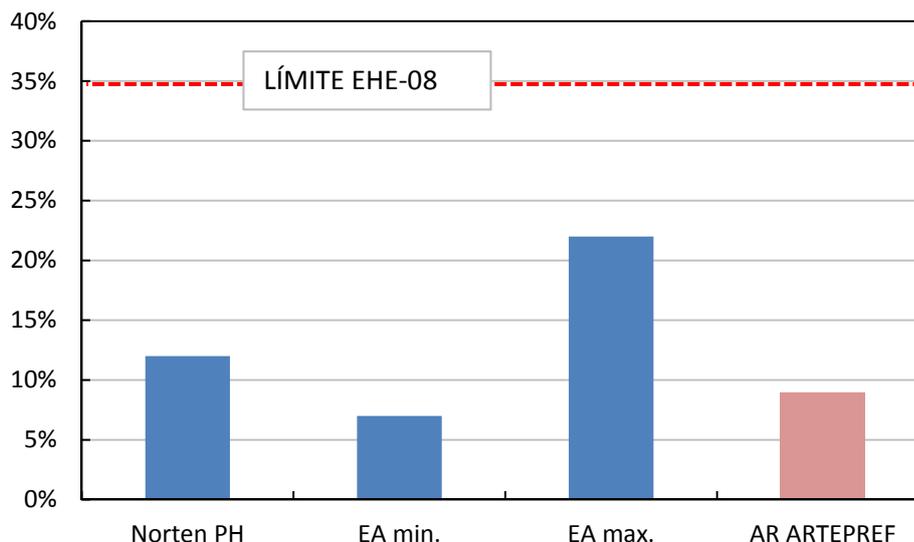


Fig. 34 Gráfico comparativo entre el índice de lajas del AR_{ARTEPREF} y los valores del estado del arte máximos y mínimo extraídos de la bibliografía y de un estudio similar con AR procedentes de prefabricados³⁶⁶.

3.2.2.5. Densidad y absorción

La determinación de la densidad y absorción de los áridos se ha realizado de acuerdo a la Norma UNE-EN 1097-6³⁶⁷. El método empleado ha sido el del picnómetro, con rango de aplicación para áridos que pasan por el tamiz de 0,063 mm. Todo ello se fundamenta en la determinación de la densidad de las partículas a partir de la relación entre masa y volumen. La masa se determina pesando la muestra de ensayo en condiciones de saturación y pesándola de nuevo tras su secado en estufa. El volumen se determina a partir del volumen de agua desplazada en el interior del picnómetro.

En la Fig. 35 se observa la muestra de árido y los picnómetros empleados.

³⁶⁶ Setién, J. and Thomas, C. (2010). Reutilización de residuos de Hormigón de una planta de prefabricados: Norten PH. Cantabria, Universidad de Cantabria.

³⁶⁷ UNE-EN-1097-6 (2001). Ensayo para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua.



Fig. 35 Ensayo densidad y absorción del árido reciclado.

Los resultados obtenidos quedan reflejados en la Tabla 23.

Tabla 23 Resultados obtenidos referentes a la densidad y absorción del árido.

Propiedad	Media
Absorción (% peso)	4,150
Densidad aparente (g/cm ³)	2,405

La absorción es una de las propiedades físicas del AR que presenta mayor diferencia con respecto al árido natural, debido a la mayor absorción de la pasta que queda adherida a él. La actual instrucción EHE-08 limita la absorción de los áridos a valores menores de 5%. Las dos muestras cumplen con los límites especificados por la EHE-08.

El AR presenta una disminución en los valores de densidad con respecto al árido natural de referencia de un 10%.

3.2.2.6. Coeficiente de Los Ángeles

Para determinar el coeficiente de Los Ángeles se siguieron las indicaciones de la norma UNE-EN 1097-5³⁶⁸.

El fundamento del método consiste en voltear una cantidad fija de árido en el interior de un tambor giratorio, junto con 12 bolas de acero. Tras 600 revoluciones el peso de material retenido por el tamiz de 1,6 mm se compara con el peso de la muestra inicial.

El cálculo del coeficiente se realiza según la siguiente expresión (4):

³⁶⁸ UNE-EN-1097-5 (1999/A1:2007). Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2 Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación.

$$LA = \frac{5000 - M_f}{5000} \times 100 \quad (4)$$

Siendo M_f la fracción de árido que pasa por el tamiz de 1,6 mm tras el ensayo.

La fotografía de la Fig. 36 muestra el aspecto del árido ensayado los valores obtenidos se especifican en la Tabla 24.

Tabla 24 Resultados ensayo de Los Ángeles.

Ensayo de Los Ángeles	Fracción granulométrica	Muestra AR ₁	Muestra AR ₂
Coefficiente de Los Ángeles	8/12,5	39%	35%
Coefficiente de Los Ángeles (Media)		37%	

Los resultados cumplen con las exigencias de la EHE, la cual limita el coeficiente de Los Ángeles del árido en general al 40%. Sin embargo, se trata de valores por encima de la media referida en el estado del arte, que supone una horquilla entre un 12% a 43% con un valor medio de 29%³⁶⁹.



Fig. 36 Aspecto de árido ensayado.

En la Fig. 37 se muestra una comparativa del Coeficiente de Los Ángeles de diferentes AR, donde puede observarse que el AR de Artepref presenta el mayor coeficiente.

³⁶⁹ Sánchez, M. (2004). Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. Tesis. Departamento de Ingeniería Civil. Madrid, ETS Caminos Madrid: 474.

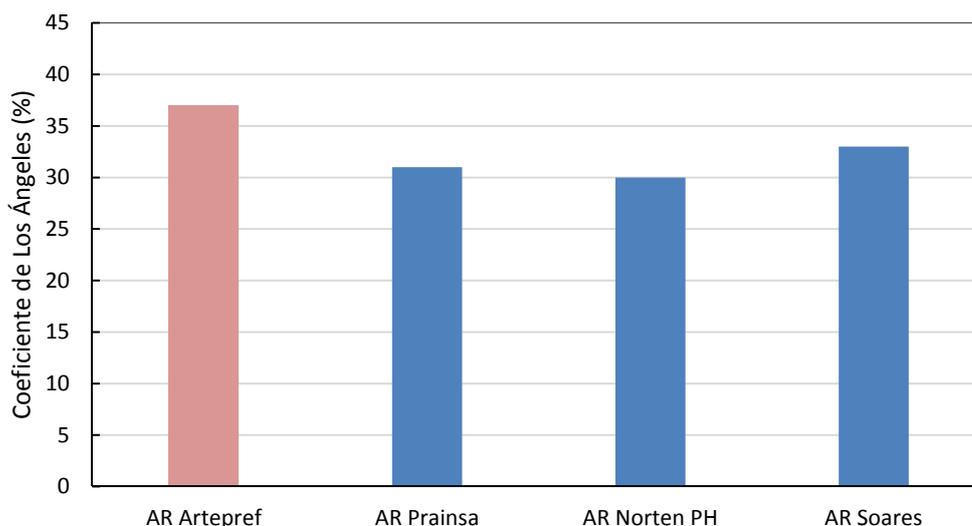


Fig. 37 Valores del Coeficiente de Los Ángeles de diferentes estudios^{370 371 372}.

El origen de estos resultados puede deberse a que en el caso que nos ocupa, los AR proceden de hormigones autocompactantes, en los que el volumen de pasta es mayor y el árido grueso es de menor tamaño.

3.2.2.7. Determinación índice de machacabilidad

Para el desarrollo de este ensayo se han seguido los protocolos establecidos en la norma UNE-83112³⁷³, recientemente anulada.

El índice de machacabilidad de un árido es un valor indicativo de su resistencia a la compresión; la compresión está ejercida por la acción de una partícula sobre las contiguas cuando éstas están sometidas a una carga exterior aplicada gradualmente, estando éstas confinadas en el interior de un recipiente rígido indeformable, según el esquema recogido en la Fig. 38.

De acuerdo con la norma, la muestra seleccionada ha de tener tamaños de partícula que pasen por el tamiz de 14 mm y sean retenidas por el tamiz de 10 mm (fracción patrón 10/14) o entre los tamices de abertura 14 y 20 mm, según sea el caso.

³⁷⁰ Pérez Benedicto, J. A. (2011). Estudio experimental sobre propiedades mecánicas del hormigón reciclado con áridos procedentes de la no calidad. Departamento de construcciones Madrid, Universidad Politécnica de Madrid.

³⁷¹ Soares, D., Brito, J., Ferreira, J. and Pacheco, J. (2014). "Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance." *Construction and Building Material* **71**: 263-272.

³⁷² Setián, J. and Thomas, C. (2010). Reutilización de residuos de Hormigón de una planta de prefabricados: Norten PH. Cantabria, Universidad de Cantabria.

³⁷³ UNE-EN-83112 (1999). Áridos para hormigones. Determinación del índice de machacabilidad.

Con la muestra seca y enfriada, se llena el recipiente por completo hasta enrasar el pistón con el borde del cilindro. Seguidamente, se vacía el molde en una bandeja y se registra la masa inicial (m_{ni}) de la muestra. A continuación, se vuelve a introducir la muestra en el recipiente sin modificar la cantidad, es decir, tratando de minimizar las pérdidas de material. No se considera, en esta ocasión, el pesaje del recipiente junto con el árido por el gran peso de éste en comparación con el de la muestra.

Tras colocar el émbolo sobre la superficie libre del árido, se aplica carga de compresión progresivamente a una velocidad de 40 kN/min, hasta un máximo de 400 kN, de tal forma que esta carga máxima debe alcanzarse en un tiempo comprendido entre 10 y 12 minutos (Fig. 38).



Fig. 38 Representación esquemática del ensayo de determinación del índice de machacabilidad del árido.

Una vez descargado el conjunto, se retira el émbolo y se extrae la muestra del interior del recipiente (Fig. 56). Esta muestra es seguidamente cribada por el tamiz de 2,5 mm de abertura, para el caso de la fracción 10/14, o por el de 3,55 mm, para la fracción 14/20, a fin de eliminar los finos producidos durante el ensayo, pesándose la cantidad de muestra retenida en dicho tamiz (m_{nf}).

El índice de machacabilidad de la fracción d/D obtenido de la determinación "n" ($M_{n,d/D}$) se obtiene calculando el tanto por ciento del material que se disgrega y pasa por el tamiz correspondiente para separar finos, en relación con la masa inicial de la muestra, de acuerdo con la expresión (5):

$$M_{n,d/D} = \frac{m_{ni} - m_{nf}}{m_{nf}} \times 100 \quad (5)$$

Se realizan dos determinaciones sobre dos muestras distintas de árido y el índice de machacabilidad (M) se expresa como la media de ambos resultados redondeada al valor entero más próximo.

En la Fig. 39 puede observarse, a la izquierda, el proceso de compactación mediante barra de acero acabada en punta. Este tipo de compactación garantiza que el árido ocupe el menor volumen posible tal y como sucede cuando se compacta el hormigón fresco durante la fabricación de probetas cilíndricas normalizadas. La imagen de la derecha de la Fig. 39 representa el inicio del ensayo y aplicación de carga mediante el pistón conectado al actuador.



Fig. 39 Compactación del material en el molde cilíndrico (izq.) y aplicación de la carga de compresión en el transcurso del ensayo de determinación del índice de machacabilidad del árido (dcha.).

En la Fig. 40 se muestra el aspecto de la muestra del ensayo de machacabilidad tras retirar el émbolo y después de su extracción del recipiente. El árido reciclado, que constituya la fracción gruesa, aquí analizada, forma parte del esqueleto de los hormigones que se elaboren con ellos.



Fig. 40 Aspecto de la muestra del ensayo de machacabilidad tras retirar el émbolo (izq.) y después de su extracción del recipiente (dcha.).

En la Fig. 41 muestra el aspecto de las dos fracciones obtenidas en el ensayo de machacabilidad tras el tamizado del árido a la conclusión del mismo.



Fig. 41 Aspecto de las dos fracciones obtenidas en el ensayo de machacabilidad tras el tamizado del árido a la conclusión del mismo.

Los resultados del ensayo de machacabilidad se resumen en la siguiente Tabla 25.

Tabla 25 Índice de machacabilidad obtenido.

Índice de machacabilidad			
Masa inicial (g)	Masa final (>2,5) (g)	IM (% peso)	Densidad conjunto (g/m ³)
2380	1537	35,42	1,95

El AR procedente de la planta Artepref presenta un índice de machacabilidad ligeramente superior al reportado en la bibliografía para los AR de la empresa Norten PH. No obstante, los valores obtenidos corresponden a áridos de alta resistencia.

3.2.2.8. Clasificación de los componentes del árido grueso reciclado

La clasificación de los componentes del árido grueso reciclado se lleva a cabo de acuerdo con la norma UNE-EN 933-11³⁷⁴.

En la Fig. 42 se observa la primera fase de selección de las muestras y su secado en horno.



Fig. 42 Primera fase de selección de muestras y secado previo en horno a 50° C.

En las fotografías de la Fig. 43 se muestra la obtención del volumen de partículas flotantes. En la Tabla 26 se exponen los resultados numéricos del ensayo.

³⁷⁴ UNE-EN-933-11 (2009). Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos: Parte 11: Ensayo de clasificación de componentes de los áridos gruesos reciclados.



Fig. 43 Foto izquierda y foto centro: decantado de las partículas flotantes; foto derecha: volumen de partículas flotantes en el ensayo de clasificación por componentes.

Tabla 26 Resultados del ensayo de partículas flotantes.

		Partículas flotantes (cm ³ /kg)
V _i (volumen inicial) (cm ³)	152	4
V _f (volumen final) (cm ³)	148	

La Tabla 27 recoge el resultado del ensayo por componentes y en las fotos de la Fig. 44 se muestran los componentes según la designación reflejada en la Norma.



Fig. 44 Foto donde se refleja la separación por componentes.

Tabla 27 Resultados del ensayo de separación por componentes.

Componente	Masa (g)	Proporción (%)
X (Arcilla arena. Metales ferrosos y no ferroso, Madera no Flotante, Plástico y caucho y yeso)	6,42	0,58
Rc (Hormigón, productos de hormigón, mortero, Unidades de albañilería Hormigón)	906,5	82,25

Componente	Masa (g)	Proporción (%)
Ru (Áridos no tratados, piedra natural, Áridos tratados con conglomerantes hidráulicos)	186,42	17,01
Rb (Ladrillos tejas, Unidades de albañilería de silicato tricálcico. Hormigón aireado no flotante)	4,02	0,36
Ra (Materiales bituminosos)	0	0
Rg (Vidrio)	0	0

Los límites establecidos en la EHE-08 de impurezas para el árido reciclado han de cumplir las siguientes condiciones mostradas en la Tabla 28.

Tabla 28 Resultado del ensayo de impurezas.

Elementos	Límites EHE-08 (%)	Impurezas en AR (%)
Material cerámico	5	0,36
Partículas ligeras	1	0,015
Asfalto	1	0
Otros materiales (PVC)	1	0,76

Las impurezas obtenidas son resultado de la trituración llevada a cabo en la central de tratamiento y cuyo origen está en el solado donde se ha efectuado la trituración primaria y una zona de tráfico de camiones de transporte de la central de residuos. También existen impurezas de restos de PVC, correspondientes a los separadores de las armaduras embebidas en el hormigón que han sido triturados, algunos de ellos de manera conjunta con el hormigón.

3.2.2.9. Terrones de arcilla

Para establecer el contenido de terrones de arcilla se toma como referencia la norma UNE 7133:1958³⁷⁵. El procedimiento consiste en secar la muestra del ensayo hasta peso constante, extendiéndola inmediatamente después sobre bandejas, y buscar con la vista terrones de arcilla desmenuzándoles cuidadosamente con los dedos.

³⁷⁵ UNE-7133 (1958). Determinación de terrones de arcilla en áridos para la fabricación de morteros y hormigones.

En ninguna de las fracciones de árido analizadas se han encontrado cantidades significativas de terrones de arcilla.

Según la instrucción EHE-08, el contenido de terrones de arcilla, no deben ser superiores al 0,25% en el caso del árido grueso.

3.2.2.10. Contenido de materia orgánica

El ensayo se realiza conforme a la norma UNE EN-1744-1³⁷⁶. Lo mismo que en el caso anterior, determinaremos del contenido de materia orgánica sobre una muestra.

Los resultados del ensayo de determinación del contenido de materia orgánica se adjuntan en la Tabla 29.

Tabla 29 Resultados obtenidos del ensayo de materia orgánica.

Ensayo	AR (% peso)
Materia orgánica	0,04

El contenido de materia orgánica depende del tipo de AR. Durante el proceso de trituración en la central de tratamiento donde se llevó a cabo dicho proceso, zona de paso de camiones, pudo haber una pequeña contaminación del árido.

3.2.2.11. Resistencia a la helada

La resistencia a la helada en áridos se evalúa mediante la comprobación del contenido de sulfato de magnesio de acuerdo con la norma UNE-EN 1367-2³⁷⁷.

El ciclo consiste en sumergir mediante una cesta perforada los áridos en una disolución de sulfato de magnesio durante 17 horas, (Fig. 45). Tras escurrir durante un tiempo de 2 horas y cubrirlo se deja reposar 5 horas en condiciones ambientales de laboratorio. El ensayo consta de 5 ciclos repitiendo lo anteriormente descrito (Fig. 46). Los resultados se expresan en la pérdida de masa obtenida, en porcentaje después de los cinco ciclos, esto es (6):

$$S = 100x \frac{(M_1 - M_2)}{M_1} \quad (6)$$

Siendo:

M_1 masa inicial de la probeta.

³⁷⁶ UNE-EN-1744-1 (1999). AP 14.2. Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Determinación de contaminantes ligeros.

³⁷⁷ UNE-EN-1367-2 (1999). Ensayos para determinar las propiedades térmicas y de alteración de los áridos Parte 2 Ensayo de sulfato de magnesio.

M_2 masa final del árido retenida por el tamiz de 10 mm.



Fig. 45 Ensayo de sulfato de magnesio con la muestra sumergida en solución de sulfato magnésico durante 8 h.



Fig. 46 Pesaje después de los ciclos y material de árido que pasa por el tamiz 10 mm.

La resistencia a la helada en áridos se evalúa mediante la comprobación del contenido de sulfato de magnesio, tal y como se describió en la metodología. Los resultados obtenidos quedan reflejados en la Tabla 30.

Tabla 30 Resultados del ensayo de resistencia a la helada a partir de la solución en sulfato de magnesio.

Resistencia a la helada: ensayo sulfato de magnesio

Valor del sulfato de magnesio MS en submuestra 1 (%)	9,32 %
Valor del sulfato de magnesio MS en submuestra 2 (%)	13,70 %
Valor medio del porcentaje del sulfato de magnesio (%)	11,51 %

La actual instrucción EHE-08 limita el porcentaje máximo a 18% por lo que la muestra ensayada cumple holgadamente con dicha especificación. Los resultados

obtenidos pueden incluirse en el rango de valores de la bibliografía consultada que se encuentra entre un 2% y 22%.

3.2.2.12. Contenido de mortero adherido

Esta técnica de caracterización es utilizada únicamente para los áridos reciclados, no existe aún ningún procedimiento normalizado. Los métodos encontrados en la bibliografía para determinar la cantidad de mortero adherido han sido presentados en el estado del arte.

- *Tratamiento con ácido clorhídrico.*
- *Fabricación de hormigón con una matriz de cemento de color diferente (Análisis de imágenes).*
- *Hielo deshielo.*
- *Método de choque térmico.*

Para el desarrollo de esta tesis doctoral se ha utilizado el método de choque térmico³⁷⁸, ya que es aplicable a cualquier tipo de árido reciclado y es considerado efectivo y fácil de realizar. Además existen resultados de otros investigadores que han utilizado este método con áridos reciclados producidos en España^{379 380}, lo que ofrece parámetros de referencia.

Para el ensayo se procede de la siguiente forma:

- *Se parte de la muestra 4/12,5 mm para obtener dos fracciones (4/8 y 8/12,5).*
- *De ellas se separan las partículas distintas de árido de hormigón, es decir, asfalto terrones, plásticos, madera etc. y se pesa el resto de la muestra*
- *Se pesan aproximadamente, 600 g de muestra y se introduce en la estufa a 80° hasta peso constante.*
- *Un vez seca la muestra se toman 500 g, llamando a esta masa m_i .*
- *Se sumerge en agua fría durante dos horas con el fin de saturar el mortero que queda adherido a los áridos.*

³⁷⁸ Barra, M. (1996). Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón estructural. Departamento de construcciones. , Universidad Politécnica Cataluña.

³⁷⁹ Sánchez, M. (2004). Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. Tesis. Departamento de Ingeniería Civil. Madrid, ETS Caminos Madrid: 474.

³⁸⁰ Sánchez, M. and Alaejos, P. (2010). Aspectos químicos del árido reciclado relacionados con la durabilidad del hormigón. CEDEX.

- Seguidamente se calienta en la mufla a 500° C durante dos horas consiguiendo una rápida evaporación del agua que ocupa los poros y creando tensiones en el mortero que facilitan la separación.
- Desde la mufla, inmediatamente se sumerge la muestra en agua fría. Las tensiones así producidas producen una desagregación y facilitan la separación.
- Es posible que parte del mortero quede adherido todavía, por lo que será necesario separarlo manualmente con un martillo de goma, o rascando superficialmente.
- Una vez separado todo el mortero, tamizamos por el tamiz 4 mm, tamaño que dejara pasar todas las partículas de mortero desprendido.
- Secamos el árido retenido por ese tamiz a 80 ° C hasta masa constante llamando a esta masa m_f el contenido de mortero será (7):

$$\% \text{ Mortero} = \frac{m_i - m_f}{m_i} 100 \quad (7)$$

En las Fig. 47 Fig. 48 se muestra la secuencia de pasos seguidos para la determinación del mortero adherido.



Fig. 47 Separación de tamaños y mufla.

En la Fig. 49 se muestra la obtención mediante pesaje de la parte correspondiente al árido y el mortero adherido.



Fig. 48 Foto izquierda choque térmico mediante pulverización agua. Foto centro y derecha: separaciones mortero de árido ayudadas por martillo de goma.



Fig. 49 Pesaje de mortero adherido (foto izquierda) y árido (foto derecha).

Los resultados obtenidos del ensayo sobre porcentaje de mortero adherido en la muestra de AR, se incluyen en la Tabla 31 para las distintas fracciones de árido.

Tabla 31 Resultados del ensayo de mortero adherido.

Material	Media (% en peso)
% mortero adherido en fracción 4/8	58,9
% mortero adherido en fracción 8/12,5	55,2

Las muestras ensayadas quedan por debajo del límite del 60% referenciado en la bibliografía. Puede observarse que la proporción de mortero adherido es mayor para el tamaño comprendido entre 4/8 mm que para el 8/12,5 mm. En general el hormigón autocompactante presentará un mayor contenido de pasta debido a la incorporación de Filler, por lo que las cantidades de mortero adherido serán mayores que en el caso de los hormigones tradicionales.

La Fig. 50 compara los resultados obtenidos con los de otros autores. Se observa que cuanto menor es el tamaño máximo del árido, mayor es el contenido de mortero

adherido y, al contrario, a mayor tamaño máximo de árido menor es el contenido de mortero.

En la mayoría de los estudios puede observarse que la cantidad de mortero adherido para tamaños de 10/20 mm es menor. No obstante el método de trituración empleado incrementa estos valores³⁸¹ ³⁸², e influye notablemente sobre esta propiedad.

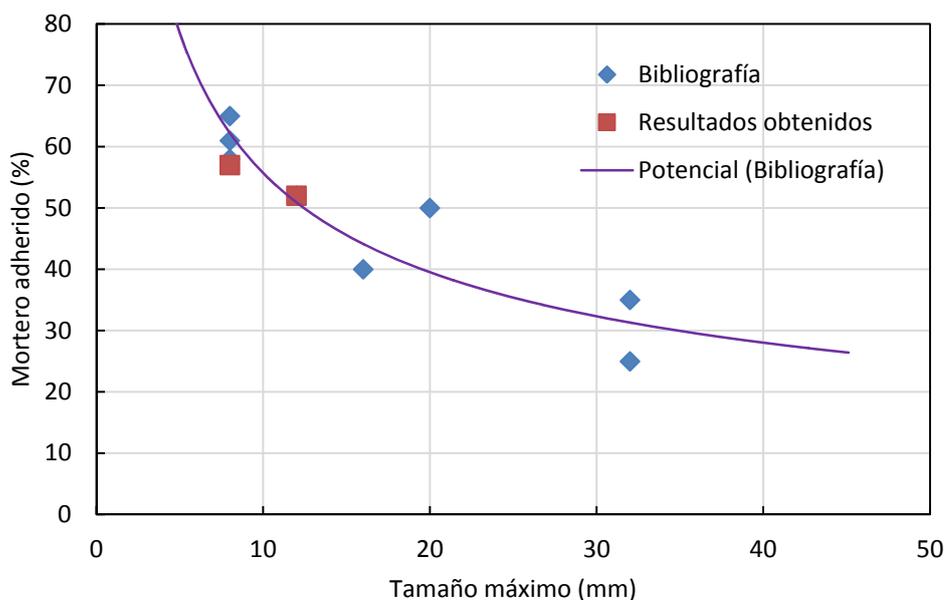


Fig. 50 Gráfico comparativo del ensayo experimental con bibliografía.

3.2.2.13. Contenido de sulfatos solubles en ácido

El contenido en compuestos totales de azufre del árido reciclado es generalmente debido a la presencia de yeso y, en menor medida, al mortero o impurezas que presenta el árido.

El contenido en sulfatos se considera perjudicial por las reacciones expansivas del cemento afectando a la durabilidad de los hormigones o morteros. La presencia de éstos como ya quedó reflejada en el Estado del Arte, es un hecho demostrado en áridos reciclados mixtos por el yeso que se utiliza en construcción.

La determinación de los sulfatos solubles en ácido se realizan según la norma UNE 17744³⁸³, los sulfatos se extraen empleando una disolución de ácido clorhídrico

³⁸¹ Domingo, A., Lázaro, C., Gayarre, F. and Serrano, M. (2009). "Long term deformations by creep and shrinkage in recycled aggregate concrete." *Materiales and Structures* **47**(8): 1147-1160.

³⁸² Sánchez, M. and Alaejos, P. (2009). "Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate." *Construcción and Building Material* **23**: 872-877.

³⁸³ UNE-EN-17744-AP12 (2010). Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1 análisis químico. apartado 12: Determinación de los sulfatos solubles en ácido.

diluido, el contenido de iones sulfato se determina por gravimetría y se expresa en porcentaje en masa del árido.

La muestra previamente se seca en estufa a $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$, posteriormente se muele la muestra y se reduce hasta obtener una masa de aproximadamente de 20 g, triturándose a continuación las partículas hasta que todas pasen a través de una tamiz de $125 \mu\text{m}$, tomándose 8 g de este material como porción de ensayo.

Se pesa la porción de ensayo m_6 , redondeando a los 0,1 g, esta muestra se introduce en 360 ml de agua y 40 ml ácido clorhídrico concentrado, calentándolo sobre una matraz Erlenmeyer hasta el punto de ebullición.

Después se retira del calor y, mientras se agita, se rocía la porción de ensayo con la disolución ácida y se deja durante 15 ± 1 minutos a temperatura justo por debajo de ebullición.

Se filtra el residuo haciéndolo pasar a través de un filtro de grado medio y se recoge el filtrado en un vaso de precipitados, se lava el contenido del filtro con agua caliente desmineralizada. Se comprueba la ausencia de iones de cloruro en el agua de lavado ensayo con nitrato de plata, mediante el procediendo de lavado del precipitado unas cinco o seis veces. El proceso se ilustra en la Fig. 51.

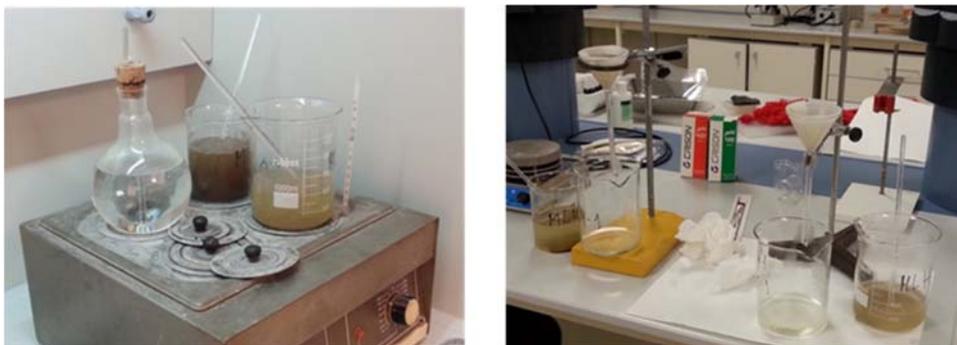


Fig. 51 Fotos de ensayo. Calentando muestras a punto de ebullición. Filtrado de la muestra.

Luego se lava el filtro y su contenido con unos mililitros de agua y se recoge el filtrado en un tubo de ensayo, al cual se le añaden posteriormente unas gotas de ácido nítrico concentrado y la disolución previamente realizada de nitrato de plata. Se comprueba la ausencia de turbidez o de precipitado en la disolución la cual indica que el agua de lavado no posee iones de cloruro.

Se ajusta el volumen a unos 600 ml con agua desmineralizada y se calienta el vaso de precipitados hasta una temperatura por debajo del punto de ebullición.

Se prepara la disolución alcalina mediante la adición de hidróxido de amonio y se comprueba su alcalinidad empleando rojo de metilo como indicador.

Se hierve a fuego lento durante 30 s y se filtra con una succión suave, empleando un filtro de porosidad media. Se lava el contenido del filtro al menos tres veces con un poco de agua caliente desmineralizada reservándose el filtrado y rechazando el precipitado.

Se acidifican los filtrados y las aguas de lavado mediante ácido clorhídrico hasta obtener un color rojo como el indicador de rojo metilo.

Se lleva a ebullición y se deja hervir durante $5 \pm 0,5$ minutos y se comprueba que la disolución esté clara. En caso de no estarlo se inicia de nuevo el ensayo empleando una nueva porción de ensayo (Fig. 52).

Durante la ebullición se le añaden lentamente a la disolución agitando vigorosamente 40 ml de una disolución de cloruro de bario (100 g de cloruro de bario en 1 litro de agua y se filtra haciéndolo pasar a través de un filtro medio) calentada a una temperatura justo por debajo del punto de ebullición. Se deja reposar, se filtra y se calcina el precipitado de sulfato de bario (m_7).



Fig. 52 Comprobación alcalinidad y filtrado final.

El contenido en sulfatos solubles en ácido del árido se determina mediante la ecuación (8):

$$SO_3 = \frac{m_7}{m_6} \times 34.30 \text{ (en \%)} \quad (8)$$

Siendo:

m_6 masa del precipitado en g.

m_7 masa de la porción de ensayo en g.

Los valores de los porcentajes de compuestos totales de azufre y de los sulfatos solubles en ácido expresado en SO₃ se muestran en la Tabla 32.

Tabla 32 Contenido de sulfatos.

Designación	Muestra 1	Muestra 2
Contenido en sulfatos SO ₃ (%)	0,500%	0,510%
Media:	0,505 %	

Las recomendaciones para la utilización de árido reciclado establecen el mismo límite que para el árido natural, que según la normativa española corresponden a un 1% de compuestos totales en azufre expresado es SO₃⁻ y un 0,80% de sulfatos solubles en ácido. El árido reciclado ensayado cumple con estas dos limitaciones.

En la bibliografía consultada, los valores de SO₃ están comprendidos entre 0,43 y 0,75% para la fracción 4/8 y 0,34 a 0,52% para la fracción 8/16 mm.

Otros estudios específicos^{384 385} obtienen valores de contenido de áridos solubles en ácido comprendidos entre 0,1 y 0,55% para la fracción 4/8 mm y de 0,1 a 0,4% para la fracción 8/16 mm.

Una de las causas del mayor contenido en sulfatos en el árido reciclado, respecto del árido natural, se debe a la presencia de compuestos de azufre procedentes del cemento del mortero adherido.

En el caso que nos ocupa, dado que la proporción de mortero adherido es mayor respecto de la de otros áridos reciclados, procedentes de hormigones no autocompactantes, la proporción de sulfatos es también lo es.

3.2.2.14. Determinación de sulfatos solubles en agua.

Se determinan los compuestos totales de azufre, como de los sulfatos solubles atendiendo a la Norma EN 17744³⁸⁶. Consecuentemente al procedimiento descrito se determinaran el contenido en sulfatos de los extractos, empleando espectrofotómetro.

El cálculo de llevará a cabo utilizando la siguiente ecuación (9):

³⁸⁴ Sánchez, M. and Alaejos, P. (2010). Aspectos químicos del árido reciclado relacionados con la durabilidad del hormigón. CEDEX.

³⁸⁵ Sánchez, M. and Alaejos, P. (2009). "Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate." *Construccion and Building Material* **23**: 872-877.

³⁸⁶ UNE-EN-17744-AP10.2º (2012). Ensayos para determinar las propiedades químicas de los aridos.Parte 1 analisis quimico.apartado 10.2º: Determinacion de los sulfatos solubles en agua en aridos reciclados.

$$TSO_4 = ((C_{SO_4} - C_0) / 10000) P / P - C_{H_2O} = (C_{SO_4} - C_0) / 250 \quad (9)$$

El contenido en sulfatos puede ser muy variable en los áridos reciclados, sobre todo en los mixtos, dependiendo de las características del material de origen, del procesamiento utilizado en la planta de reciclaje y de la presencia de contaminantes como el yeso cuando el material proviene de edificación.

La determinación de los sulfatos solubles en agua en áridos reciclados se realiza sobre una probeta de ensayo del árido reciclado se mezcla con agua caliente para extraer los iones de sulfato solubles en agua, a la que se añade cloruro de bario, tamponado a pH neutro, de tal forma que los iones sulfato precipitan en forma de sulfato de bario. A continuación, se determina el contenido de sulfatos solubles en agua por espectrofotometría Fig. 53.

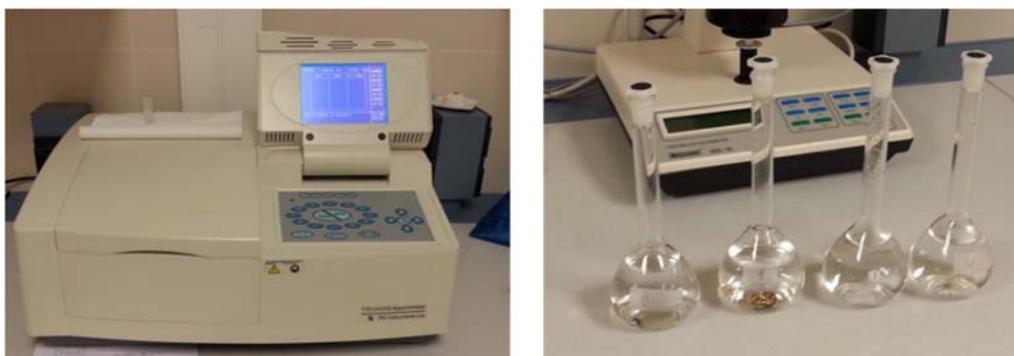


Fig. 53 Espectrógrafo y disoluciones obtenidas.

Para preparar una muestra de árido reciclado se hace pasar por el tamiz 4 mm, y se introduce en un vaso de precipitados marcado. Para la preparación de los extractos se pesan 1.000 ± 5 g de agua destilada previamente calentada a una temperatura de 60 ± 5 ° C, la cual se añade a la muestra de árido reciclado y se cubre mediante vidrio reloj. Se agita el contenido del vaso de precipitados durante 15 ± 1 minutos con un agitador magnético manteniéndolo a una temperatura de 60 ± 5 ° C.

Inmediatamente se filtran 200 ± 50 ml de la disolución extraída mediante filtro rápido y se vierte sobre un vaso de precipitados. Se tampona la disolución filtrada con ácido nítrico hasta obtener un pH de 7 ± 1 .

Sobre esta disolución se le añade el cloruro de bario y se agita vigorosamente durante 30 segundos y se deja reposar 5 minutos. Se agita de nuevo el tubo de ensayo durante 10 segundos hasta que los cristales de $BaSO_4$ se pongan en suspensión.

Se deja reposar 15 segundos para permitir que cualquier burbuja de aire se disperse y se registra la lectura del espectrofotómetro de C_{SO_4} en mg/l.

El contenido en sulfatos solubles SO_4 en agua se calcula empleando la ecuación (10):

$$T SO_4 = \left[\left((C_{SO_4} - C_0) / 10.000 \right) \frac{P}{P'} \right] - C_{H_2O} \quad (10)$$

Donde:

$T SO_4$ contenido en sulfatos solubles en agua de las muestra en %.

C_{SO_4} contenido en sulfatos solubles en agua de las muestra en %.

C_0 resultado del espectrofotómetro obtenido en el ensayo en blanco.

C_{H_2O} resultado del espectrofotómetro obtenido para el agua de ensayo.

P masa de agua en g empleada en el filtrado de la muestra.

P' masa en g de la porción del ensayo.

Los resultados del ensayo de determinación del contenido de sulfatos solubles en agua se muestran en la Tabla 33.

Tabla 33 Sulfatos solubles al agua.

	Muestra 1	Muestra 2
T SO_4 (%)	6,27	7,87
Media (%)	7,07	

Los valores de sulfatos solubles se encuentran entre los valores habituales para áridos reciclados.

3.2.2.15. Contenido de cloruros solubles en agua: Método Volhard

Los áridos reciclados de hormigón suelen presentar un contenido apreciable de cloruros que varía, en función de la procedencia del hormigón usado como materia prima. La concentración de cloruros es especialmente elevada en áridos reciclados que provienen de obras marítimas o de pavimentos expuestos a las sales para el deshielo, también es significativa en los hormigones que han utilizado aditivos acelerantes.

La determinación de los cloruros solubles en agua se determina conforme a la norma UNE 17744³⁸⁷, en el cual se añade un exceso de una disolución de nitrato de plata a la disolución que contiene los iones de cloruro, y la cantidad de la disolución de nitrato de plata que no ha reaccionado se valora por retroceso con una disolución patrón de tiocianato, utilizando como indicador una disolución de sulfato de amonio y hierro.

Se parte de una muestra de árido secado a una temperatura de 110 ± 5 ° C, la cual se transfiere a unas botellas, las cuales se pesan registrándose su masa (Fig. 54).

Se añade agua a cada botella con una masa igual a la de la probeta, y se agitan 60 minutos mediante un agitador de sacudidas.



Fig. 54 Muestras de los áridos y botellas con áridos y agua.

Luego se filtran los extractos haciéndolos pasar a través de filtros de textura media, hasta que se hayan recogido en vasos de precipitados limpios y secos, como mínimo 100 ml del filtrado con un tono claro o ligeramente opalescente.

Con la ayuda de una pipeta se toman 100 ml del extracto filtrado y se transfieren a un matraz Erlenmeyer de 250 ml. Se añaden 5 ml de ácido nítrico y, a continuación, la disolución de nitrato de plata contenida en la bureta hasta que se produzca la precipitación completa de todos los cloruros, y posteriormente se añade en exceso. Se deja la disolución durante 5 minutos a una temperatura por debajo justo del punto de ebullición, luego se deja enfriar, y se añade la disolución de nitrato de plata, registrándose el volumen de éste (V_5) (Fig. 55).

³⁸⁷ UNE-EN-17744-AP7 (2012). Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1 análisis químico. Apartado 7: Determinación de los cloruros solubles en agua empleando el método de Volhard.



Fig. 55 Muestras sacadas del agitador (Foto izquierda) y Filtrado de las muestras (Foto derecha).

Se añaden 2 ml de trinitil-1-hezanol y se tapa el matraz y se agita vigorosamente para coagular el precipitado. Después se le añaden 5 ml de sulfato de amonio y se valora con la disolución patrón de tiocianato contenida en la bureta C_T , hasta que se produzca el primer cambio permanente de color (de blanco opalino a marrón oscuro) y la disolución tenga la misma intensidad de color que la utilizada como patrón, se registra el volumen consumido de la disolución de tiocianato V_6 .

El contenido en iones de cloruro C del árido se calcula mediante la siguiente ecuación (11):

$$C = 0.003\ 546\ W [V_5 - (10\ C_T\ V_6)] \text{ (en \% en peso)} \quad (11)$$

Dónde:

- V_5 volumen de la disolución de nitrato de plata (en ml).
- V_6 volumen añadido a la disolución patrón de tiocianato (en ml).
- C_T concentración de la disolución patrón de tiocianato (en mol/ml).
- W relación agua/árido (en g/g).

Los resultados correspondientes al ensayo de determinación del contenido de cloruros solubles en agua se reflejan en la Tabla 34.

Tabla 34 Contenido de cloruros solubles en agua.

	Muestra 1	Muestra 2
Contenido ión Cl (% peso)	0,0005	0,0005

El AR procedente de Artepref presenta valores inferiores a los máximos permitidos por la instrucción EHE-08, según el cual el contenido de ion Cl no podrá exceder de 0,05% en masa del árido cuando se utilice hormigón armado u hormigón en masa

que tenga armaduras para reducir fisuración y de un 0,03% en masa para uso en hormigón pretensado.

Los áridos reciclados pueden presentar un contenido apreciable de cloruros en función de la procedencia del hormigón usado como materia prima.

Dado que el AR no procede de obras marítimas, ni de puentes o pavimentos que hayan sido expuestos a sales para el deshielo, ni se han utilizado en el hormigón de origen aditivos acelerantes, se considera suficiente el ensayo realizado.

3.2.2.16. Determinación de las pérdidas por calcinación

La determinación de las pérdidas por calcinación se realizan según la norma UNE 17744³⁸⁸ mediante la calcinación del árido en aire en una temperatura de 975 ± 25 ° C para eliminar el dióxido de carbono y el agua no evaporada durante el secado, junto con todos los elementos volátiles oxidables presentes.

En primer lugar se seca la muestra a una temperatura de $(110 \pm 5$ ° C), después se muele y se reduce la muestra por etapas hasta obtener una masa de aproximadamente de 20 g, triturándose a continuación las partículas hasta que todas pasen a través de una tamiz de 125 μ m, luego se toma una masa de 1 ± 5 g como probeta de ensayo, la muestra se introduce en un crisol que previamente se ha calcinado y pesado.

El crisol y la muestra se meten en un horno a una temperatura de 975 ± 25 ° C durante al menos 60 minutos, después se deja enfriar a temperatura ambiente y se vuelve a pesar.

Las pérdidas por calcinación se calculan mediante la ecuación (12):

$$\text{Pérdidas por calcinación} = \frac{m_{13} - m_{14}}{m_{13}} \quad (12)$$

Siendo:

m_{13} masa inicial de la muestra de ensayo en g.

m_{14} masa inicial de la porción de ensayo calcinada g.

Los resultados del ensayo de pérdidas por calcinación se resumen en la Tabla 35.

³⁸⁸ UNE-EN-17744-AP17° (2012). Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1 análisis químico. Apartado 17: Determinación de las pérdidas por calcinación.

Tabla 35 Pérdidas por calcinación.

Pesos	Muestra 1	Muestra 2
Perdidas por calcinación (% peso)	0,490	0,455
Media (% peso)	0,472	

Los resultados de la pérdida por calcinación son admisibles atendiendo a los parámetros habituales contemplados.

3.2.2.17. Determinación de contaminantes ligeros

La determinación de los contaminantes ligeros que afectan al acabado superficial se realiza según la norma UNE 17744³⁸⁹. El objetivo de este ensayo es determinar la existencias de partículas ligeras en los áridos, tales como lignito, carbón, etc., que pueden producir, en los hormigones o morteros, manchas o ampollas en el acabado superficial.

Para la realización del ensayo se parte de una muestra de 5 kg, al cual se reduce mediante cuarteo para obtener una masa de 350 ± 50 g ; dicha muestra se extiende sobre una bandeja y se seca hasta masa constante en estufa a 110 ± 5 ° C, se pesa la masa secada (m_9). Se separa el árido haciéndolo pasar por una tamiz de 300 μ m rechazando la fracción más fina.

Se vierte 1 litro de cloruro de cinc en un vaso de precipitados de 2 litros y a continuación se vierte el árido en la disolución. Se agita el lecho del árido con una varilla de vidrio para facilitar que las partículas dejen el lecho y asciendan hasta la superficie, (Fig. 56).

³⁸⁹ UNE-EN-17744-AP14.2° (2012). Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1 análisis químico. Apartado 14.2°: Determinación de contaminantes ligeros.



Fig. 56 Cloruro de cinc y vertido del árido sobre el cloruro de cinc.

Se decanta la disolución sobrante mediante un segundo vaso de precipitados haciéndola pasar por un tamiz de 250 μm , dejando que las partículas flotantes queden retenidas en el tamiz (Fig. 57).



Fig. 57 Decantado de precipitados y partículas retenidas.

Se lava el tamiz y las partículas en el mismo con agua hasta que se elimine la disolución de cloruro de cinc. Se seca el tamiz y su contenido durante 20 ± 4 h, a una temperatura de 40 ± 5 ° C, y a continuación se vierte el contenido en una cabina de evaporación y se completa el secado a una temperatura de 110 ± 5 ° C durante $4 \pm 0,25$ h. La Fig. 58 muestra el decantado y las partículas resultantes.



Fig. 58 Decantado y partículas resultantes.

Se deja enfriar la cápsula y a continuación se pesan las partículas ligeras (m_{10}).

Los resultados del ensayo de contaminantes ligeros se presentan en la Tabla 36.

Tabla 36 Determinación contaminantes ligeros.

Porcentaje contaminantes ligeros	(% peso)
Media	0,625

Las limitaciones para las partículas ligeras oscilan entre el 0,1% y el 1%, como se aprecia en los resultados, el árido reciclado de hormigón se encuentra dentro de estos límites, aunque según otros estudios³⁹⁰ otros tipos de AR podrían alcanzar valores próximos al 6%.

3.2.2.18. Solubilidad al agua

La determinación de la solubilidad en agua se realiza según la norma UNE 17744³⁹¹. Para su realización se reduce una muestra de árido mediante cuarteo (m_{11}), esta muestra se transfiere a una botella y se le añade a cada botella una masa de agua igual al doble de la masa de la probeta de ensayo, se pesa cada botella y su contenido y se registra la masa, calculando la masa del árido en cada botella por diferencia de pesadas (Fig. 59).

Posteriormente se cierran herméticamente las botellas y se mezcla su contenido por medio de un agitador de sacudidas durante 24 h como mínimo.

³⁹⁰ Sánchez, M. (2004). Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. Tesis. Departamento de Ingeniería Civil. Madrid, ETS Caminos Madrid: 474.

³⁹¹ UNE-EN-17744-AP16° (2012). Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1 análisis químico. Apartado 16: Determinación de la solubilidad al agua.



Fig. 59 Muestras del árido del ensayo de solubilidad al agua.

Se filtran los extractos haciéndolos pasar a través de papeles de filtro de textura media y secos hasta que al menos se obtengan 100 ml de filtrados claros en vasos de precipitados limpios.

Se filtra la mayor parte del líquido sobrante haciéndolo pasar por un filtro de textura media, previamente tarado. Se transfiere el árido decantado de la botella de extracción, con la ayuda de la cantidad mínima de agua, a un recipiente previamente tarado, añadiendo el papel del filtro y las partículas retenidas al contenido del recipiente.

Se seca y se enfría el contenido del recipiente hasta masa constante y se pesa.

Se calcula la masa del árido seco restando al valor anterior las masas del recipiente y del papel del filtro (m_{12}).

En las Fig. 60 y Fig. 61 muestran la secuencia del ensayo descrito.

La solubilidad en agua del árido se determina mediante la ecuación (13):

$$W_s = \frac{m_{11} - m_{12}}{m_{11}} \times 100 \text{ (en \%)} \quad (13)$$



Fig. 60 Filtrado de precipitados y recipiente con árido decantado.



Fig. 61 Filtrado y secado al horno.

En la Tabla 37 se exponen los resultados correspondientes al ensayo químico de determinación de solubilidad en agua.

Tabla 37 Determinación del contenido de materiales solubles en agua.

	Muestra 1	Muestra 2
Solubilidad W _s (% peso)	0,70	0,67
Media (% Peso)	0,685	

Los resultados obtenidos se encuentran dentro de los parámetros normales correspondientes.

3.2.2.19. Composición química del árido reciclado

La composición química del AR realizado por fluorescencia de rayos X se refleja en la Tabla 38.

Tabla 38 Composición química en óxidos del AR.

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	MgO	TiO ₂	C
37,4	56,53	2,16	1,1	0,16	1,32	0,79	0,098	0,47

La composición química de los áridos reciclados revela que se trata, como era de esperar, de un árido reciclado muy limpio. La composición se corresponde con la composición de un clinker portland hidratado combinado con áridos de naturaleza silíceo.

No se han encontrado en la literatura valores de composición química de otros áridos reciclados de estas características si bien este resultado puede ser de utilidad para determinar otros aspectos químicos relacionados con la durabilidad.

3.2.2.20. Reactividad álcali-árido

La utilización de árido reciclado puede favorecer las reacciones álcali-árido en el hormigón, debido por una parte al mayor contenido de álcalis que aporta la pasta de cemento adherida al árido reciclado y, por otra parte, a la mayor dificultad en el control de los áridos causada por la heterogeneidad y diversa procedencia de este tipo de áridos. En el caso que ocupa la procedencia son los residuos del propio material de desecho y no conforme nos garantiza su menor variabilidad, sin embargo, la proporción abundante de mortero adherido hace que se somete a las comprobaciones que estima la EHE. Para ello, y a falta de realizar una petrografía, se atiende a la posibilidad de realizar el ensayo para determinar la reactividad potencial de los áridos con los alcalinos, UNE-EN-146509 EX³⁹² comprobando que la expansión al finalizar el ensayo no supere el 0,04% del volumen.

Para ello se parte de una amasada con un 100% de AR cuyos componentes son los que recogen la Tabla 39.

Tabla 39 Dosificación específica para realización ensayo reactividad álcali-árido.

Dosificación para un metro cúbico HR-45							
Mezcla	Arena silíceo 0/2 (kg)	Grava silíceo 2/12,5 (kg)	Grava reciclada (kg)	Filler calizo (kg)	Cemento I-52.5 (Kg)	w/c teórica	H ₂ O
HR 45-100%	720	0	1040	240	320	0,35	110

La cantidad de NaOH a añadir al agua de amasado será la siguiente:

Para conseguir probetas con $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ al 1,25% en peso de cemento:

- *Contenido de álcalis Na_2O valor entre 0,75-0,95.*

³⁹² UNE-EN-146509-EX (1999). "Determinación de la reactividad potencial de los áridos con los alcalinos Métodos de los prismas de hormigón."

- Contenido de NaOH a añadir al agua de la dosificación 0,9, valor aportado por laboratorio de Cementos alfa en consulta realizada.
- Cantidad de cemento por m³ dosificación: 320 kg.
- Cantidad de alcalinos del hormigón 0,90% \times 320: 288 kg.
- Cantidad de alcalinos si se aumenta al 1,25%: 320 \times 1,25=4 kg.
- Cantidad a aumentar 4-2,88: 1,12 Kg de Na₂O_{Eq.}

Siguiendo el procedimiento de la Norma y operando adecuadamente para obtener la proporción NaOH a añadir a la amasada, al agua de amasado hemos de añadir 1148 g/m³ NaOH resultantes. En la Tabla 40 se muestra la dosificación empleada.

Tabla 40 Dosificación ajustada según la proporción NaOH calculada.

Dosificación AR para HR-45								
Mezcla	Arena silícea 0/2 (kg)	Grava silícea 2/125 (kg)	Grava reciclada (kg)	Filler calizo (kg)	Cemento I-52.5 (kg)	w/c teórica	H ₂ O (l)	NaOH (g/m ³)
HR-45-100%	720	0	1040	240	320	0,35	100	1448

En la Fig. 62 se muestran los componentes y la solución de NaOH.



Fig. 62 Foto izquierda preparación solución de NaOH; y componentes para la dosificación incluido solución NaOH en la foto derecha.

Una vez obtenidas las probetas, tras 28 días de curado en cámara, se prepara el recipiente para alojar a las probetas envuelto en papel para evitar el goteo por las paredes y tapa. Se introduce una rejilla de separación del fondo y se llena de agua el fondo sin tocar la base inferior de las probetas (Fig. 63).



Fig. 63 Preparación de las probetas y recipiente aislado con papel traza para evitar goteo humedad.

A continuación, todo el recipiente se introduce en un segundo recipiente de mayores dimensiones con agua a temperatura 36 ± 2 ° C indicada por la norma.

Se tomarán mediciones cada mes y se observará la evolución de las superficies observando que no aparezcan fisuras, deformaciones, exfoliaciones etc.



Fig. 64 Recipiente preparado a una temperatura de 36 ± 2 ° C y HR=100%.

Se llevó a cabo el ensayo “Métodos de los prismas de hormigón” para determinar la reactividad potencial de los áridos con los alcalinos. Los resultados de inspección de las probetas se presentan en Fig. 65 y Fig. 66.



Fig. 65 Foto de evolución de las probetas con el tiempo.

Como se puede apreciar, no se detectan signos externos de fisuración, desconchamientos, ni otros síntomas que denoten posible alteración.

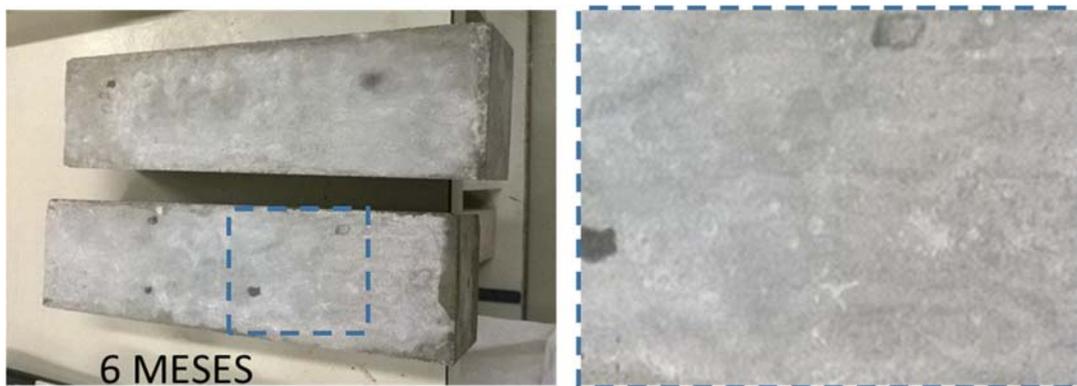


Fig. 66 Estado de las probetas después de 3 meses y 6 meses (Foto derecha: zoom indicado).

La gráfica de la Fig. 67 representa los valores de expansividad del ensayo realizado sobre dos probetas con sustitución de 100% de AR a lo largo del periodo establecido. Se observa un incremento de longitud más acusado durante los dos primeros meses, estabilizándose posteriormente y permaneciendo prácticamente constante, o con un ligero aumento de poca magnitud, en el resto de periodo.

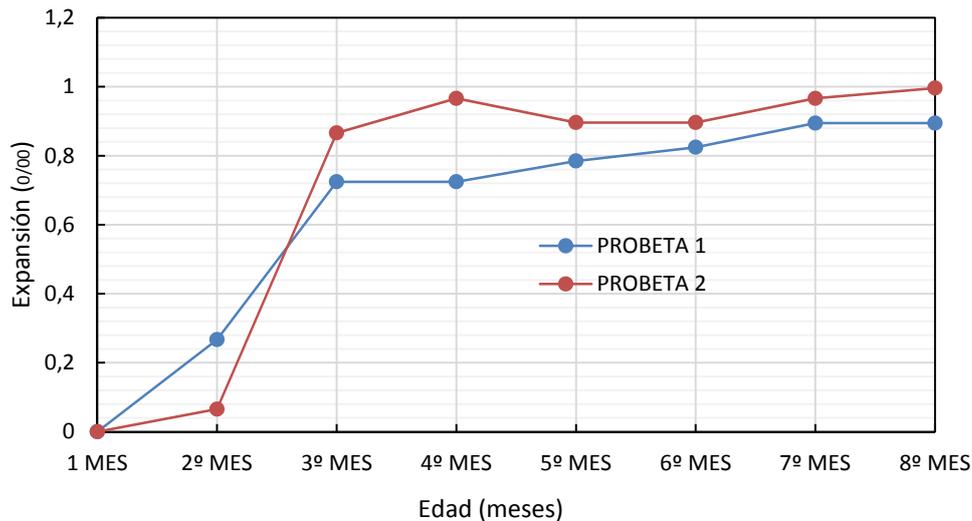


Fig. 67 Gráfica de la evolución de la expansividad de las probetas HR-45 con grado de sustitución 100%.

La expansión de las probetas después del ensayo no supera el límite de 0,04% respecto del valor inicial, atendiendo a la EHE-08³⁹³, obteniéndose valores de expansividad muy pequeños.

3.2.3. Comparativo de los resultados obtenidos con otras experiencias

La experiencia en España y Portugal con áridos procedentes de elementos prefabricados se resume en tres, Prefabricados Nortén PH, Prainsa y Soares. El siguiente comparativo relaciona las propiedades principales de estos estudios con el árido reciclado ensayado en la factoría Artepref (Tabla 41). También se describen los valores habituales recabados en el Estado del Arte, referentes a las propiedades de los áridos reciclados

³⁹³ Límite establecido de expansión según UNE-146509 EX, al finalizar el ensayo según Artículo 28.7.6 Reactividad álcali-árido, actual Instrucción Hormigón Española

Tabla 41 Tabla comparativa de experiencias con áridos procedentes de prefabricados incluido el árido reciclado objeto del presente estudio de caracterización.

ENSAYO	Limitaciones EHE-08	Árido origen GC90/15	Artepref	Prainsa ³⁹⁴	Norten ³⁹⁵	Soares ³⁹⁶	Valores habituales
Contenido de finos (% peso)	< 1	f _{1,5}	0,41	0,45		-	0,27-1,14
Módulo granulométrico	-	2/12,5=6,5	6,68	-	6,78	-	6,2-7,6
Índice de lajas (% peso)	<35	-	7,90	4	12	-	7-22
Coefficiente de forma (% peso)	UNE -933-4 (>0,2)	-	2,25	2	11	11,5	1-15
Densidad aparente partículas (g/cm ³)		2,4	2,41	2,43	2,48	2,6	2,1-2,4
Los Ángeles (% peso)	<40	LA ₂₀	37	31	31	33,3	25-42
Índice machac. (% peso)	-	-	30	-	30	-	-
Absorción (% peso)	< 5	1,16	4,15	7,3	4,19	4,57	3,5-8,48
Material cerámico (% peso)	5	0	0,1	0	0	-	0-0,5
Partículas ligeras (% peso)	1	<0,1	0,1	0,3	0,038	-	0,5-5
Asfalto (% peso)	1	0	0	0	0	-	0-0,5
Otros materiales (% peso) (vidrio plásticos)	1	0	0	0	0	-	0-0,5
Terrones arcilla (% peso)	<0,60	No contiene	NO	0	0,25	-	0,05-0,6
Materia orgánica (% peso)		No contiene	NO	0,01	-	-	
Contenido cloruros (% peso)	< 0,05 HA >0,03 HP	<0,1	0,0005	0,01	0,001	-	0-0,04
Perdida a la helada (% peso)	<18	-	11,51	20	2	-	0-2

³⁹⁴ Perez-Benedicto J.A., Del Rio-Merino M., Peralta-Canudo J.L. and Mata, R.-L. (2012). "Características mecánicas de hormigones con áridos reciclados procedentes de rechazos en prefabricación." *Materiales de Construcción* **62**(305): 25-37.

³⁹⁵ Setién, J. and Thomas, C. (2010). Reutilización de residuos de Hormigón de una planta de prefabricados: Norton PH. Cantabria, Universidad de Cantabria.

³⁹⁶ Soares, D., Brito, J., Ferreira, J. and Pacheco, J. (2014). "Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance." *Construction and Building Material* **71**: 263-272.

ENSAYO	Limitaciones EHE-08	Árido origen GC90/15	Artepref	Prainsa ³⁹⁴	Norten ³⁹⁵	Soares ³⁹⁶	Valores habituales
Compuestos de azufre (% peso)	<1	<0,1	0,25	0,52	5,6	-	0,43-0,75
Contenido sulfatos (% peso)	<0,8		0,44	0,49	-	-	0,10-0,62
Sulfatos solubles en ácido (% peso)		AS 0,2	0,5	0,52	0	-	0,10-0,62

3.2.4. Estudio y procedencia del resto de materias primas

El esquema de diseño de un hormigón destinado a los múltiples elementos prefabricados requiere unas materias primas específicas.

3.2.4.1. Cemento

El cemento utilizado es un cemento tipo I-52,5 R conforme a la Norma UNE-EN 197-1:2000 suministrado por Cementos Alfa, factoría ubicada en Mataporquera, del grupo cementero Portland Valderribas S.A. que posee certificado CE N° ER-0879/1997 Aenor N=015/00198/03.

Las características químicas, que pueden resultar de interés, y que han sido aportadas por el Departamento de Calidad de Artepref se muestran en la Tabla 42.

Tabla 42 Resultados de los ensayos realizados sobre el cemento utilizado y aportados por el departamento de calidad.

Ensayos en cemento I-52,5 R	
Ensayo	Resultado promedio (% en peso)
Perdida por calcinación/perdida fuego	1,0
Residuo insoluble	0,6
Sulfatos SO ₃	3,1
Cloruros	0,03
Contenido álcalis	0,7-0,8

3.2.4.2. Áridos naturales

Los áridos utilizados presentan unos tamaños de 0/2 y 2/12,5 mm, poseen un certificado de control de producción en fábrica en cumplimiento de la directiva 89/106/CEE marcado CE N° de registro Applus ER-0370-CPD-1393 atendiendo a las

Normas EN 12620:2002+A1:2008; EN13043:2002; EN13043:2002/AC:2004 EN 13139:2002 y EN 13139:2002/AC:2004.

Si bien se disponen de los ensayos preceptivos que la empresa realiza dentro de su sistema de control de calidad basado en la ISO-9001, de control de árido aportados por el Departamento de calidad, se ensayan muestras tomadas en fábrica, para el tamaño 0/2 y 2/12,5 mm. Las curvas granulométricas resultantes, quedan recogidos en la Fig. 68.

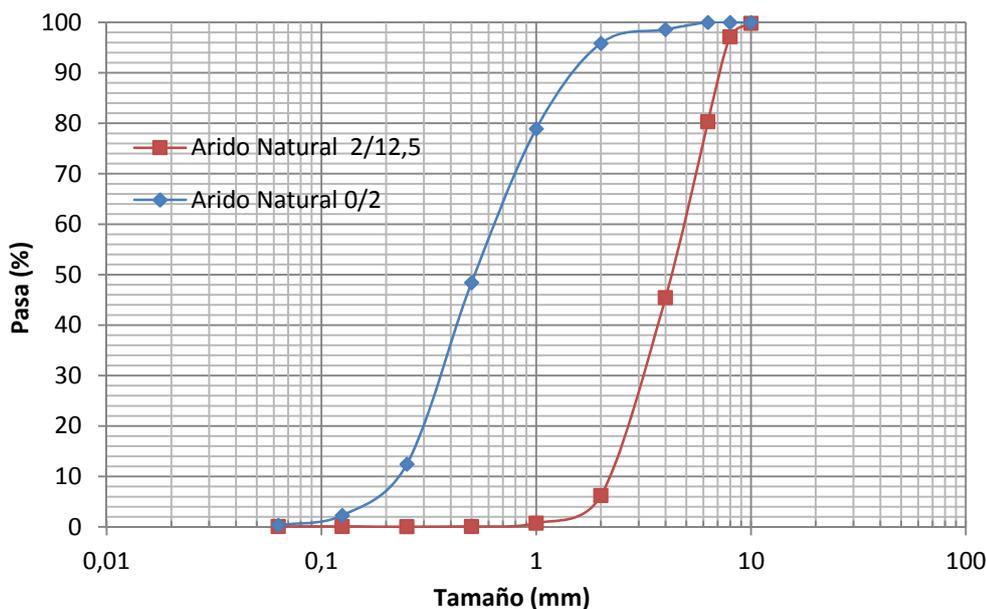


Fig. 68 Distribución granulométrica de los áridos naturales de tamaño 0/2 y 2/12,5.

La designación de los áridos naturales atendiendo a la EHE-08, Tabla 43.

Tabla 43 Designación de los árido naturales utilizados

Material	d/D	Módulo	Categoría-Designación
Arena natural	0/2	2,13	G _F 85 (AF R 0/2 S L)
Árido grueso natural	2/12,5	5,7	G _C 90/15 (AG R 2/12,5 S L)

También se han realizado ensayo de densidad y absorción en laboratorio del árido natural (Tabla 44).

Tabla 44 Resultados sobre los áridos naturales según fracción ensayada.

Fracción ensayada	Árido natural	
	Árido 0/2	Árido 2/12
Densidad aparente (g/cm ³)	2,64	2,68
Absorción (% peso)	0,26	1,16

3.2.4.3. Aditivos

Los aditivos utilizados por la empresa en sus dosificaciones y que adoptaremos más adelante en nuestra campaña de ensayos son:

El Sika ViscoCrete®-20 HE, especialmente adecuado para la confección de hormigones de altas resistencias iniciales, hormigones con gran necesidad de reducción de agua y de excelente fluidez. Las proporciones recomendadas están entre 0,5-1% en peso del cemento.

El segundo producto empleado es ViscoCrete®-5920 HE³⁹⁷ Superplastificante de alto rendimiento dedicado a HAC con bajo contenido en agua. La proporción recomendada será de 0,5 a 1,5% en peso respecto el peso del cemento.

Los hormigones tratados con estos productos se caracterizan por su bajo contenido de agua, una fluidez elevada, así como una cohesión óptima y una gran facilidad de autocompactación. Es empleado para: Hormigones autocompactantes, hormigones con una gran reducción de agua y hormigones de altas prestaciones. Las propiedades aportadas por el fabricante se exponen en la Tabla 45.

Tabla 45 Propiedades de los aditivos utilizados.

Composición química composición	Sika ViscoCrete®-20 HE Policarboxilato	ViscoCrete®-5920 HE Policarboxilato
Densidad (kg/l)	1,09 (+20 °C)	1,08
Valor de pH	4,5 ± 1,0	5 ± 1
Residuo seco	40,0 ± 0,1 H %	40,0 ± 0,1 H %
Viscosidad Ca. (mPas)	145 ± 23 °C	145 ± 23 °C
Proporción recomendada en % Pc	0,2-0,8	0,5-1,5
Contenido cloruros (%)	<0,1	<0,1

3.2.4.4. Filler calizo

Procede de Zaragoza con marcado CE y declaración de conformidad UNE-EN 12620 UNE-EN 13139 y UNE-EN 13043, las propiedades más relevantes proporcionadas por el productor se muestran en la Tabla 46.

³⁹⁷ Se utiliza en la confección de hormigones en prefabricación, obras y en centrales de hormigón preparado.

Tabla 46 Descripción y composición química del filler empleado.

Planta de producción BELCHITE (Zaragoza) certificado ISO 9001		
Descripción	Carbonato cálcico natural, fabricado a partir de roca caliza seleccionada con elevada blancura y alto grado de pureza química y ausencia de metales pesados. Árido no reactivo al álcali-carbonato ni al álcali silíceo y exento de materia orgánica.	
Composición química	CaCO ₃	>96,5% peso
	MgCO ₃	<0,3% peso
	Fe ₂ O ₃	>0,02% peso
	Insolubles en HCl	<0,2% peso
	Cloruros (EN-1744-1)	0,001% peso
	Azufre total	<1% peso

3.3. DISEÑO DE LAS DOSIFICACIONES CON ÁRIDO RECICLADO

Para fabricar los hormigones reciclados se han empleado los mismos componentes que para los hormigones de control sustituyendo el porcentaje en peso de árido grueso natural por un 0%, 20%, 50% y 100%. Los apartados siguientes tienen como misión adaptar las dosificaciones empleadas en fábrica a las condiciones de laboratorio con las sustituciones de grava natural por el árido reciclado obtenido y caracterizado.

3.3.1. Diseño de las dosificaciones

La dosificación empleada de partida corresponde a las que habitualmente son utilizadas en fábrica (ARTEPREF) y cuyas codificaciones son:

HA-30/L/12,5/ A, HA-45/L/12,5 A y HP-45/L/12,5/ A

Las tres designaciones anteriores cubren la mayor parte de la gama de elementos prefabricados armados y pretensados.

La codificación adoptada, justificada en la actual Normativa EHE-08, en esta investigación incluirá el grado de sustitución correspondiente, con la siguiente designación:

HR-30/AC/12,5/A y HR-45/AC/12,5/A

Siendo:

HR Designación de hormigón reciclado.

Valores **30, 45** Resistencia característica a los 28 Días (f_{ck}).

AC Referido a la tipificación del Anexo 17 apartado 39.2 de la EHE-08.

Valor **12,5** Valor de Tamaño máximo de árido empleado.

A Tipo de Ambiente³⁹⁸.

Para las designaciones anteriores se toman como base las dosificaciones que la empresa ARTEPREF utiliza habitualmente y que han quedado reflejadas en el apartado 3.1.2 y se resumen en la Tabla 47.

Tabla 47 Dosificaciones de partida para la obtención del hormigón de control y que serán base para la obtención del HR con sustituciones de AR.

TIPO	Arena sílicea 0/2 (kg)	Grava sílicea 2/12,5 (kg)	Filler calizo (kg)	Cemento I-52.5 (kg)	Sika 20HE (g)	Sika 5920 (g)	Relación w/c
HR-30 (Control)	650	1150	310	250	1090	560	0,45
HR-45 (Control)	650	1150	290	320	1150	730	0,35

El diseño de los patrones de hormigón, según las codificaciones expuestas, pretende ser útil para la mayor parte de elementos que se fabrican en la empresa Artepref y que coinciden con empresas de prefabricación de características similares. El diseño de las dosificaciones queda expuesto en los siguientes apartados.

3.3.2. Obtención de la dosificación definitiva

Para la obtención de las dosificaciones definitivas, y una vez que se han caracterizado todos sus componentes, se procede a los ajustes necesarios para adecuar los tamaños de árido, ajustes de humedad por condiciones de laboratorio y sustituciones empleadas, que serán la base del programa experimental.

La incorporación de las proporciones de AR, de 20%, 50% y 100% en peso, supone ciertos ajustes en las dosificaciones anteriores, debido a las distintas distribuciones granulométricas de los áridos.

Para los áridos finos, la norma DIN1045, y para áridos gruesos, la EHE-08 son muy restrictivas. Para los áridos de menor tamaño es más apropiada la norma EHE-1998, coincidente con la ASTM, así como los métodos de dosificación de Fuller o

³⁹⁸ Tabla 8.1 Correspondiente a los ambientes generales a los que va a estar expuesto un elemento de hormigón EHE-08. Los ambientes reflejados en dicha tabla suponen diferentes afecciones que posteriormente serán tratadas en apartados específicos.

Bolomey, tal y como se expuso en el estado del arte a partir de los trabajos de Martín-Morales³⁹⁹.

Se ha considerado el método de Fuller como el más adecuado para aproximar el déficit de árido en la fracción 2/4 mm. Denominaremos m_{g0-2} , $m_{g4-12,5}$, m_{Fuller} a los módulos granulométricos de los áridos naturales 0/2 mm, del AR de tamaño 4/12,5 mm y el modulo granulométrico de Fuller para la mezcla respectivamente. Se obtiene que:

$$m_{g0-2} \quad 2,13$$

$$m_{g4-12} \quad 6,68$$

$$m_{gFuller} \quad 4,80$$

El ajuste se realiza según la formulación (14):

$$t_1 = \frac{m_{g4-12,5} - m_{Fuller}}{m_{g4-12,5} - m_{0-2}} 100 \quad (14)$$

$$t_2 = 100 - t_1 \quad (15)$$

Siendo t_1 el porcentaje resultante del árido 0/2 y t_2 el porcentaje resultante del AR 4/12,5.

Resultando:

$$t_1=41\% \text{ y } t_2=59\%$$

En la Fig. 69 se muestra la granulometría de todos los áridos, la parábola de Gesner, obtenida por el método Fuller, y la distribución granulométrica del conjunto de áridos dosificados.

Para optimizar el esqueleto de los áridos que se van a incorporar a la dosificación, una cantidad mayor de arena suple la falta árido de tamaño entre 2/4 mm.

³⁹⁹ Martín-Morales, M., Sánchez-Roldan, S., Zamorano, P., Valverde, S. and Palacios, T. (2013). "Métodos granulométricos en la caracterización del árido reciclado para uso en hormigón estructural." *Materiales de Construcción* **63**(310): 235-249.

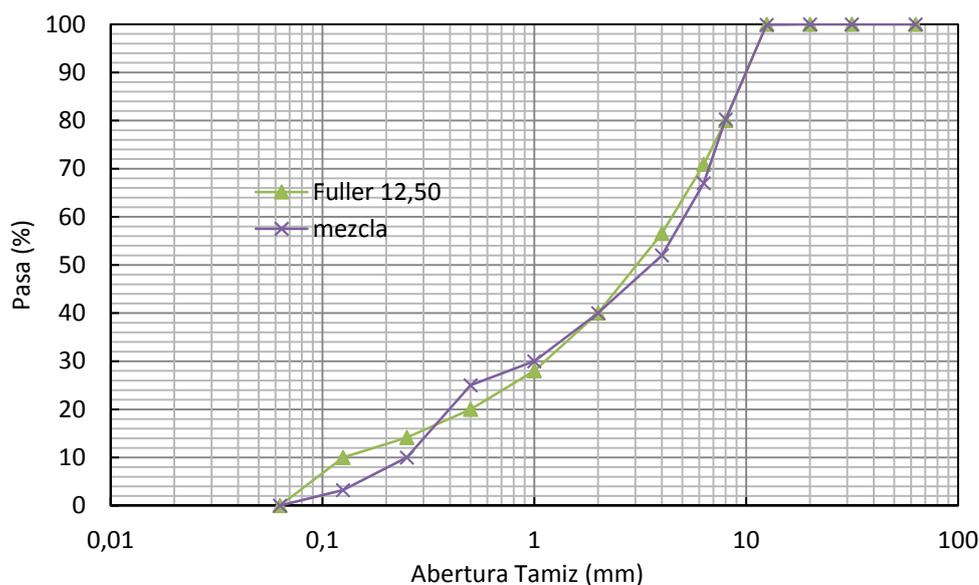


Fig. 69 Gráfico resultante de la mezcla y curva de la mezcla Fuller.

Con el fin de ajustar al máximo la relación agua/cemento se tendrá en cuenta la humedad aportada por los áridos en las condiciones de laboratorio momentos antes de la amasada correspondiente.

Las dosificaciones definitivas a emplear quedan resumidas en la Tabla 48 y Tabla 49.

Dado que el empleo de dosificación con AR en estado seco (condiciones de laboratorio) afecta a la trabajabilidad del hormigón, también se han aumentado las proporciones de aditivo en las dosificaciones con sustituciones de 50% y 100%.

Tabla 48 Dosificación hormigón HR-30 ($w/c=0,45$).

Mezcla	Ud.	HR-30-0% Control	HR-30-20%	HR-30-50%	HR-30-100%
Arena silícea 0/2	kg	650	650	670	720
Grava silícea 2/12,5	kg	1150	920	540	0
AR 4/12,5	kg	0	250	540	1040
Filler Calizo	kg	320	320	320	320
Sika 20HE	g	500	500	650	850
Sika 5920	g	1300	1300	1600	2000
Cemento I-52,5	kg	250	250	250	250
Agua	l	112	112	112	112

Tabla 49 Dosificación hormigón HR-45 (w/c=0,35).

Mezcla	Ud.	HR-45 0% Control	HR-45-20%	HR-45-50%	HR-45-100%
Arena sílicea 0/2	kg	650	650	670	720
Grava sílicea 2/12,5	kg	1150	920	540	0
AR 4/12,5	kg	0	250	540	1040
Filler Calizo	kg	280	280	280	280
Sika 20HE	g	500	500	650	850
Sika 5920	g	1500	1500	1800	2200
Cemento I-52,5	kg	320	320	320	320
Agua	l	112	112	112	112

Las dosificaciones de partida empleadas para la incorporación del árido reciclado son adecuadas y cubren la mayoría de la gama de productos prefabricados que la empresa comercializa.

3.3.3. Programación y determinación de las condiciones de amasado en laboratorio

Se han determinado dos fases (Fase 1 y Fase 2) para la determinación de las condiciones de amasado en laboratorio.

Tabla 50 Condiciones de amasado.

	Fase 1	Fase 2
Grava natural	Condiciones de laboratorio	Condiciones laboratorio
Árido reciclado	Condiciones de laboratorio	Saturado
Arena	Condiciones de laboratorio	Condiciones laboratorio

Para la preparación de los materiales en la fase 1, en el caso en que las condiciones de hormigonado son las del laboratorio, actuaremos según lo siguiente:

Los materiales se mantienen en laboratorio un mínimo de 24 horas antes de la fabricación de los hormigones.

Las condiciones ambientales del laboratorio de materiales son aproximadamente 19°C de temperatura y un 45% de humedad relativa. La humedad que posee la arena en condiciones de laboratorio es de un 0,10 % de su peso.

La Fig. 70 muestra una medición del peso de la arena para establecer las condiciones en laboratorio, tras desecación en horno.



Fig. 70 Determinación de la humedad de la arena por diferencia de pesada en condiciones de laboratorio.

El árido grueso y árido reciclado se almacena cerca de las turbinas de aire caliente del taller laboratorio, por lo que la humedad será prácticamente despreciable.

Las medidas del peso se llevan a cabo mediante una báscula de 50 kg, con un error del 0,1% y una precisión de 1 g.

Los pesajes de las distintas fracciones se llevan a cabo por separado Fig. 71.



Fig. 71 Componentes de una dosificación (foto izquierda), pesaje en báscula de capacidad 50 kg (foto derecha).

Los aditivos se pesan en una balanza con una precisión de décimas de gramo.

Para la dosificación considerada como Fase 2 en que se incorpora los áridos presaturados se opera de la siguiente manera: primeramente se pesan todos los componentes, áridos, cemento, aditivos, filler y agua por separado. Posteriormente

se mezcla el aditivo con una pequeña cantidad de agua. A continuación, Fig. 72, se procede a la saturación del árido reciclado por inmersión en un cubo durante 15 minutos para, posteriormente, introducirlos en un recipiente de metal con perforaciones dentro del cual se escurre durante otros 15 minutos, con lo que la absorción se estima alcance entre un 70-80% del total de la porosidad accesible.



Fig. 72 Condiciones de saturación con superficie seca del árido grueso reciclado.

En estas condiciones el árido reciclado grueso se estima que se encuentra en condiciones de saturación con superficie seca.

3.3.4. Relación agua/cemento efectiva

La incorporación de AR como sustitutos de los áridos naturales, en la primera fase, en condiciones de laboratorio, influye sobre la relación agua/cemento efectiva, debido a la importante absorción de éstos. Para poder comparar adecuadamente las propiedades que se analicen en el programa experimental, se han calculado las relaciones agua/cemento efectivas de cada una de las dosificaciones empleadas. Esto permite analizar y comparar los distintos hormigones con su grado de sustitución. El cálculo de las relaciones agua/cemento efectivo se obtienen a partir de la fórmula (16) estimando que el árido reciclado alcanza aproximadamente el 70% de saturación.⁴⁰⁰

$$\left\{ \frac{w}{c} \right\}_{ef}^I = \frac{W - \frac{0,7}{100} \sum_i (P_i A_i)}{c} \quad (16)$$

⁴⁰⁰ Thomas, C. (2010). Hormigón reciclado de aplicación estructural: Durabilidad en ambiente marino y comportamiento a fatiga. Tesis. Departamento de Ciencia e Ingeniería de Terreno y de los Materiales. Santander, Universidad de Cantabria: 458.

Siendo:

$\left\{\frac{w}{c}\right\}_{ef}^I$ relación agua/cemento efectiva para para la fase I.

W cantidad de agua total incorporada en al amasadora.

P_i peso de los componentes (áridos) i incorporado a la dosificación en condiciones de laboratorio.

A_i absorción de los componentes i incorporados a la dosificación.

Las relaciones agua/cemento efectivas (w/c) se muestran en la Tabla 51.

Tabla 51 Relación agua/cemento efectiva para las distintas dosificaciones y sustituciones de AR.

Tipo	Relación agua/cemento efectiva (w/c)			
	0%	20%	50%	100%
HR-30	0,40	0,39	0,35	0,32
HR-45	0,31	0,30	0,28	0,25

A la vista de los resultados, existe una fuerte disminución en la relación agua/cemento efectiva en los hormigones reciclados, pasando de una relación de 0,45 a 0,32, para HR-30 y de 0,35 a 0,25 en el HR-45.

En lo referente a la segunda fase, cuando se presaturan únicamente los AR, como se verá, tiene lugar un aumento de la relación agua/cemento, basándonos en la expresión anterior (17).

$$\left\{\frac{w}{c}\right\}_{ef}^{II} = \frac{W - \frac{0,7}{100} \sum_i (P_i A_i) + (P_{AR}^{SAT} - P_{AR}^{CL})}{c} \quad (17)$$

Siendo:

$\left\{\frac{w}{c}\right\}_{ef}^{II}$ relación agua cemento efectiva (Fase 2)

W cantidad de agua total incorporada en al amasadora.

P_i peso de los componentes (áridos) i incorporado a la dosificación en condiciones de laboratorio.

A_i absorción de los componentes i incorporados a la dosificación.

P_{AR}^{SAT} peso del árido reciclado en condiciones de presaturacion.

P_{AR}^{CL} peso en condiciones de laboratorio del árido reciclado.

El resultado sobre la dosificación solo con árido reciclado presaturado se muestra en Tabla 52.

Tabla 52 Relación agua cemento efectiva Fase 2 árido reciclado presaturado exclusivamente realizado para HR-45.

	100%-S
HR-45	0,38

3.3.5. Ejecución del amasado

3.3.5.1. Equipos disponibles y preparación de materiales

El equipamiento disponible es el siguiente:

- *Báscula calibrada de 50 kg de capacidad máxima y precisión de 0,1 g. (Fig. 71).*
- *Amasadora de 80-100 litros de capacidad de eje vertical (Fig. 74).*
- *Termómetro e higrómetro para medición temperatura y humedad.*
- *Cronómetro para control tiempos de amasado y de asentamiento ensayo consistencia.*
- *Moldes normalizados para la fabricación de probetas en distintos tamaños y volúmenes (Fig. 73).*
- *Plásticos de PVC para cobertura de moldes rellenos de hormigón fresco durante 24 h.*
- *Molde para el ensayo del cono de Abrams, con chapa rígida metálica para y determinación del diámetro de escurrimiento del hormigón fresco.*
- *Flexómetro de 3 m para determinación diámetro de torta de hormigón.*
- *Cámara de humedad con humedad relativa igual o superior al 95% y una temperatura de 20 ± 2 ° C para el curado de las probetas (Fig. 75).*
- *Guantes, paletas, manguera agua, artesas y carretilla.*

Los moldes de probetas normalizadas (Fig. 73) utilizados para fabricar las muestras del hormigón se rellenaron atendiendo a la Norma UNE–EN 12350-1:2006⁴⁰¹. Las dimensiones de las probetas, para los diferentes estudios planteados, se enumeran según la siguiente tipología:

- *Probetas cilíndricas de $15\Phi \times 30$ cm.*
- *Probetas cúbicas $10 \times 10 \times 10$ cm.*

⁴⁰¹ EN-12350-8 (2012). Ensayos de hormigón fresco. Parte 1 Toma de muestras

- *Probetas prismáticas de 7,5x7,5x2,5 cm.*

Para los elementos prefabricados elaborados en planta, en la prueba industrial:

- *Viga de sección 12x24 y longitud 1,5 m.*
- *Viga de sección 24x24 y longitud 1 m.*



Fig. 73 Diferentes tipos de moldes para la confección de probetas.

3.3.5.2. Proceso de amasado en laboratorio

El amasado se ha realizado con la siguiente cadencia y en una amasadora de eje vertical como la que muestra en la Fig. 74.

Para el amasado se sigue el procedimiento estipulado en ASTM C192⁴⁰², siendo el proceso como sigue:

- *Se humedece previamente el tambor de la amasadora y se añaden los áridos gruesos.*
- *Se vierte la mitad de agua del amasado.*
- *Se dan varias vueltas a la hormigonera hasta extender los áridos.*
- *A continuación, se añade el filler y cemento.*
- *Se inicia el proceso de amasado añadiendo el resto del agua.*
- *Se realiza un primer amasado previo de 3 minutos.*
- *Se para la hormigonera y la mezcla en reposo 3 minutos.*
- *Se acciona la hormigonera otros 2 minutos.*
- *Se vierte el hormigón en una gaveta o carretilla.*

⁴⁰² ASTM-C192 (2006). Práctica Normalizada para Preparación y Curado de Especímenes de Concreto para Ensayo en Laboratorio.



Fig. 74 Proceso de amasado en hormigonera planetaria del laboratorio.

3.3.5.3. Curado del probetas

Tras el desmoldeo, con un tiempo mínimo de 24 horas, las probetas se trasladan a una cámara humedad con condiciones ambientales de 20 ± 2 ° C y humedad superior al 95%, en condiciones normalizadas para el curado de hormigón, de acuerdo con la norma UNE-EN 12390-2⁴⁰³. La Fig. 75 muestra la cámara de curado con diversas tipologías de probetas.



Fig. 75 Cámara curado probetas a temperatura $20^{\circ} C \pm 0,5$ y humedad del 95%.

Para la exposición exterior se expondrá específicamente en el ensayo correspondiente.

⁴⁰³ EN-12390-2 (2009). Ensayos del hormigón endurecido parte 2 Fabricación y curado de las probetas para ensayos de resistencia.

3.4. CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN RECICLADO

3.4.1. Control de consistencia

La fluidez del hormigón fresco se determina habitualmente mediante el método del cono Abrahams según la Norma UNE-EN 12350-2⁴⁰⁴. La medida del asiento en cm nos determina su consistencia. En nuestro caso para el empleo de hormigón autocompactante, el ensayo a realizar es el ensayo de escurrimiento descrito UNE-12350-8⁴⁰⁵.

El hormigón fresco se vierte en un cono igual al usado en el ensayo de asentamiento de la Norma EN12350-2. Al retirar el cono ascendentemente, se mide el tiempo desde que se inicia la extracción hasta que el flujo del hormigón alcanza un diámetro de 500 mm, siendo este el tiempo t_{500} . A continuación se mide el mayor diámetro del hormigón autocompactante extendido y el diámetro perpendicular a éste y la media es el escurrimiento Fig. 76.



Fig. 76 Ensayo de docilidad por escurrimiento.

El resultado se expresa con la denominación SF, siendo la media de d_1 mayor diámetro de flujo extendido en mm y d_2 es el flujo extendido a 90° de d_1 , también en mm.

⁴⁰⁴ UNE-EN-12350-2 (2006). Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento.

⁴⁰⁵ UNE-EN-12350-8 (2011). Ensayos de hormigón fresco. Parte 8:Hormigon autocompactante. Ensayo de escurrimiento.

3.4.2. Propiedades mecánicas del hormigón endurecido

3.4.2.1. Resistencia a compresión

Para los ensayos de resistencia a compresión se utilizaron probetas cilíndricas de 15x30 cm y cúbicas de 10x10 de acuerdo con la norma UNE EN 12390-3⁴⁰⁶.

En la Fig. 77 se muestra la prensa *Proeti 1500* con carga máxima 300 t utilizada para los ensayos a compresión axial.



Fig. 77 Ensayo de determinación de la resistencia a compresión.

3.4.2.2. Resistencia a tracción indirecta

Para los ensayos de resistencia a tracción indirecta se emplearán probetas cilíndricas de 15x30 cm atendiendo a la Norma UNE-EN 12390-6⁴⁰⁷.

Para la determinación del ensayo se ha utilizado soporte metálico con tapa de acero que canaliza la carga longitudinalmente a la generatriz de la probeta (Fig. 78).



Fig. 78 Prensa y utensilio utilizado y los resultados de las tres el probetas.

⁴⁰⁶ UNE-EN-12390-3 (2009). Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3 Determinación de la resistencia a compresión de probetas.

⁴⁰⁷ UNE-EN-12390-6 (2009). Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6 Determinación tracción indirecta.

La EHE-08 relaciona la resistencia característica a compresión con la resistencia media a tracción del hormigón según la ecuación (18) y (19) que se aplicará en el capítulo resultados y análisis:

$$f_{ctm} = 0,30 \sqrt[3]{f_{ck}^2} \text{ para } f_{ck} < 50 \text{ MPa} \quad (18)$$

$$f_{ctm} = 0,30 \sqrt{f_{ck}} \text{ para } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \quad (19)$$

Siendo:

f_{ctm} Resistencia característica media a tracción indirecta

El código ACI 318-02⁴⁰⁸ delimita la fórmula (20):

$$f_t = 0,49 \sqrt{f_{ck}} \quad (20)$$

Siendo f_t y f_{ck} la resistencia a tracción y resistencia característica del hormigón a compresión respectivamente.

3.4.2.3. Resistencia a flexión

Para la determinación de la resistencia a flexión se ha seguido la UNE 12390-5⁴⁰⁹. En la Fig. 79 se refleja en fotos la prensa de ensayos, el software utilizado y la probeta después de realizado el ensayo.

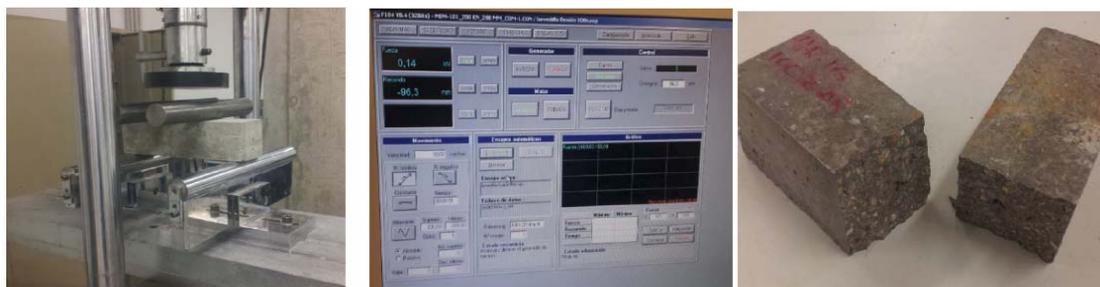


Fig. 79 Ensayo resistencia a flexión

Según la instrucción EHE-08 la resistencia a flexión y la resistencia a tracción indirecta del hormigón se pueden relacionar mediante la expresión (21) que se aplicará en el Capítulo resultados:

⁴⁰⁸ ACI-318-SR-05 (2002). Structural Concrete. A. c. Institute. Michigan.

⁴⁰⁹ UNE-EN-12390-5 (2009). Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6 Resistencia a flexion de probetas.

$$f_{ct,fl} = (0,90x f_{ci}) \frac{1 + 1,5 \left(\frac{h}{100}\right)^{0.7}}{1,5 \left(\frac{h}{100}\right)^{0.7}} \quad (21)$$

Siendo:

$f_{ct,flex}$ resistencia a flexotracción

Para las dimensiones de nuestra probeta resulta (22):

$$f_{ct,fl} = 1,65 f_{ci} \quad (22)$$

f_{ci} resistencia a tracción directa.

La relación entre la Resistencia a compresión y flexotracción resulta (23):

$$f_{ct,flex} = 0,45 \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad (23)$$

3.4.2.4. Módulo de elasticidad estático

Para la obtención del módulo de elasticidad estático se atiende a la Norma UNE 83316⁴¹⁰.

Para la realización del ensayo se determina previamente la resistencia a compresión en tres probetas de la misma amasada. Un tercio del valor medio de los tres ensayos, se utiliza posteriormente, como la tensión máxima a la que se somete la probeta durante el procedimiento establecido por la norma para la determinación del módulo de elasticidad.

A la probeta se le fijan dos collarines que permiten, una vez ajustadas en la probeta, medir las deformaciones que va experimentando, en función de la carga, mediante la incorporación de dos sensores de desplazamiento (LVDT) situados en dos generatrices diametralmente opuestas de la probeta (Fig. 80).

Después de varios ciclos graduales de carga con velocidades de $0,5 \pm 0,2$ MPa/s y tras la descarga de la misma se miden las deformaciones en los dos sensores. La media de ambas medidas será el acortamiento medio.

⁴¹⁰ UNE-EN-83316 (1996). Determinación del módulo de elasticidad en compresión.

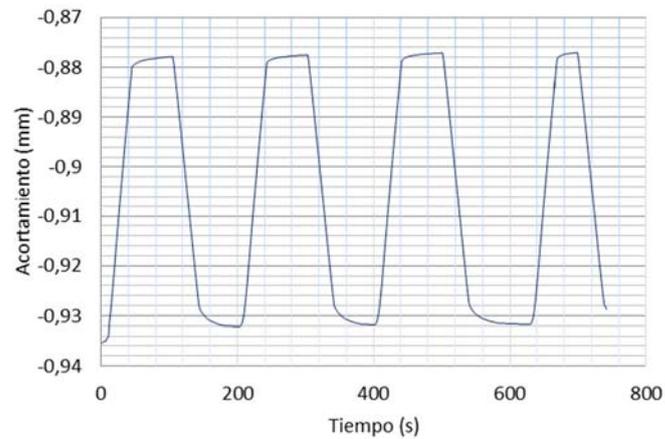


Fig. 80 Ensayo de módulo elasticidad con collarines y gráfica de escalones de acortamiento.

Las deformaciones unitarias ε_a y ε_b se obtienen dividiendo los acortamientos entre la distancia existente entre los dos collarines. El valor del módulo de elasticidad estático a compresión viene dado por la expresión (24):

$$E = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \quad (24)$$

Donde σ_a, σ_b son las tensiones correspondientes a los valores de deformación son $\varepsilon_a, \varepsilon_b$.

En la Fig. 81 muestra la representación del ensayo atendiendo a la tensión aplicada en los escalones de carga descritos y la deformación resultante en el eje de abscisas. La pendiente de las recta es característica del módulo de elasticidad estático.

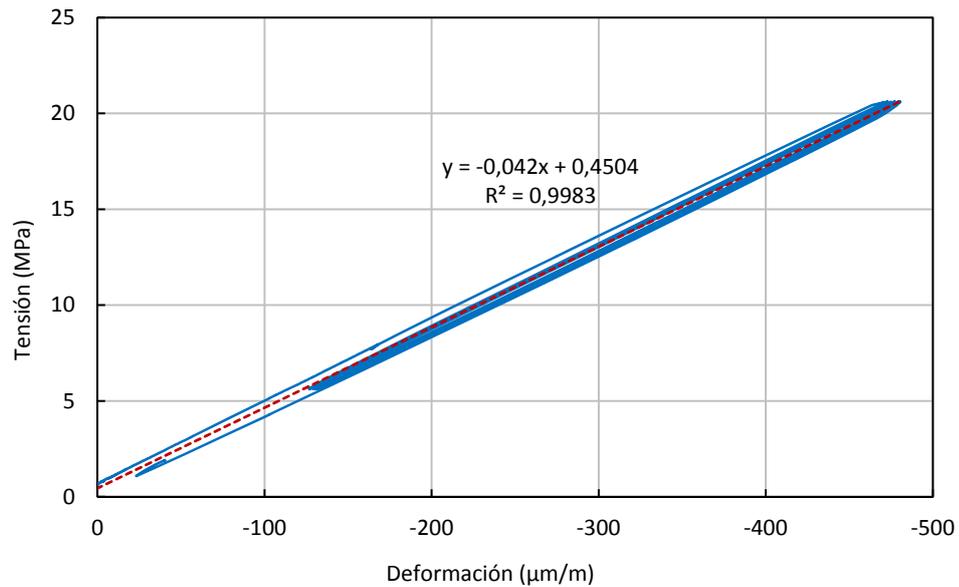


Fig. 81 Diferentes escalones de carga descarga. La medición se deberá tomar en el último escalón.

Las fórmulas que relacionan el módulo de elasticidad con la resistencia a compresión contenidas en la normativa son (25):

Instrucción EHE-08:

$$E_c = 8,50 \sqrt[3]{f_{cm}} \quad (0\% \text{ AR}) \quad (25)$$

Siendo f_{cm} La resistencia media a compresión

Algunos autores⁴¹¹ introducen una corrección (26) de la fórmula anterior para hormigones con 100% árido reciclado:

$$E_c = 7,58 \sqrt[3]{f_{cm}} \quad (100\% \text{ AR}) \quad (26)$$

La formulación del Código ACI-318:83 es (27):

$$E_c = 43w^2 \sqrt[3]{f_c} \cdot 10^{-6} \quad (27)$$

⁴¹¹ Sánchez, M. and Alaejos, P. (2012). Estudio sobre las propiedades del hormigón fabricado con áridos reciclados. Monografías CEDEX. M. d. Fomento. Madrid. **Monografías:** 220.

Donde:

E_c módulo de elasticidad.

w densidad del hormigón.

f_c resistencia a compresión simple

También se ha tenido en cuenta la siguiente formulación para la comparación de los resultados que se expondrán en el Capítulo 4 Resultados y Análisis (Tabla 53).

Tabla 53 Estudios y formulación del módulo de elasticidad según diversos autores.

Autor	Fórmula
Ravindraraja ⁴¹²	$E_c = 5,31f_{cu}^{0,51/3} + 5,83$
	$E_c = 3,02f_{cu}^{0,51/3} + 10,67$ para HR-100%
Dhir ⁴¹³	$E_c = 370f_c + 13100$
Kakizaki. ⁴¹⁴	$E_c = 2,1 \left(\frac{ds}{2,3}\right)^{1,5} \left(\frac{f_c}{200}\right)^{0,5}$

ds: densidad hormigón según % grado sustitución tomada de los ensayos.

f_{cu}: resistencia a compresión simple

3.4.2.5. Módulo de elasticidad dinámico

Para la determinación del módulo de elasticidad dinámico se mide, (Fig. 82) la velocidad de propagación de una onda ultrasónica de acuerdo a la Norma UNE-EN 21504-4⁴¹⁵.

Cuando un impulso ultrasónico se envía al hormigón, la energía se irradia en todas direcciones, creándose tres tipos de ondas principales que poseen velocidad propia y que son conocidas como: ondas longitudinales, ondas trasversales y ondas de superficie o Rayleigh. El módulo de elasticidad dinámico puede determinarse

⁴¹² Ravindrarajha, R. and Tam, c. (1987). "Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate." *Magacin of Concrete Research* **37**(130): 29-38.

⁴¹³ Dhir, R. K. and Limbchiya (1999). "Suitable of recycled concrete aggregate for use BS 5328 Designated Mixes." *Structures and Building*.

⁴¹⁴ Kakizaki, M., Harada, M., Soshiroda, T., Kubota, S., Ikeda, T. and Kasai, Y. (1988). Strength and elastic Modulus of Recycled Aggregate Concrete and Masonry,. *Demolition And Reuse of demolition Waste.RILEM Symposium on demolition and Reuse of concrete Masonry. JAPAN. 2*: 623-632.

⁴¹⁵ UNE-EN-12504-4 (2006). Ensayos de hormigón de estructuras. Parte 4 Determinación de la velocidad de los impulso ultrasónicos

midiendo cualquiera de las tres velocidades si bien la fórmula que lo determina especifica la velocidad longitudinal que viene dada por (28):

$$E_d = V_l^2 \rho \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu} \quad (28)$$

Donde ν es el coeficiente de Poisson, que se considera constante y que para el hormigón tiene un valor de 0,2. El valor ρ es la densidad del hormigón y V_l es la velocidad longitudinal.



Fig. 82 Ensayo ultrasonidos en probeta cilíndrica 150x300 a la edad 180 días.

3.4.3. Propiedades físicas y mecanismos de transporte. Aspectos influyentes en la durabilidad

3.4.3.1. Porosidad y absorción

La norma española no establece un ensayo específico para la determinación de la porosidad del hormigón en estado endurecido. A partir de la Norma ASTM C-642⁴¹⁶ (Fig. 83), se puede obtener la porosidad accesible al agua, que es la principal responsable de aportación de sustancias nocivas y agresivas desde el exterior.

Existe también un ensayo, semejante al anterior descrito, de acuerdo con la Norma UNE-EN 1916⁴¹⁷ y UNE-EN 1339⁴¹⁸.

⁴¹⁶ ASTM-C642 (2006). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.

⁴¹⁷ UNE-EN-1916 (1999). Tubos y piezas complementarias de hormigón en masa, hormigón armado y hormigón con fibras.

⁴¹⁸ UNE-EN-1339 (2003). Baldosas de hormigón: Especificaciones y métodos de ensayo.



Fig. 83 Ensayo de absorción según el método ASTM C642.

Para estimar los valores del ensayo se determinó la diferencia de peso existente entre las probetas anteriormente descritas secadas en estufa a $100 \pm 5^\circ \text{C}$ hasta peso constante (P_s) y después de saturar la misma probeta sumergida con agua (P_{ss}) y se relacionó con el (P_{ss}) según la fórmula (29):

$$A_{abs} = \frac{P_s - P_{ss}}{P_{ss}} \times 100 \quad (29)$$

Donde:

P_{ss} peso saturado superficie seca.

P_s peso seco en estufa.

La medición de la porosidad en laboratorio se obtuvo saturando de agua la probeta hasta peso constante y secándola en estufa a temperatura 50°C comparado posteriormente las masas según la ecuación (30):

$$P_a = \frac{P_{ss} - P_s}{P_{ss} - P_{sum}} \quad (30)$$

Donde P_{ss} y P_s son valores anteriores descritos.

P_{sum} peso sumergido de la probeta saturada de agua, en la balanza hidrostática.

$P_{ss} - P_{sum} = V_a$ (volumen aparente).

3.4.3.2. Succión capilar

Se realizó el ensayo de succión capilar conforme a la Norma UNE 83982⁴¹⁹: *Durabilidad del hormigón Método de ensayo*, procedimiento que sigue la norma

⁴¹⁹ UNE-EN-83982 (2006). Determinación de la absorción capilar del hormigón endurecido Método de Fagerlund.

Suiza (SIA 162/1, 1989), cuyo objeto es determinar el coeficiente de absorción del agua por capilaridad del hormigón endurecido.

El método consiste en registrar el cambio de peso de una muestra de hormigón que se encuentra en contacto con el agua en uno de sus extremos con una altura de agua de 5 mm (Fig. 84).

Utilizaremos probetas de sección 150 mm y altura 75 mm extraídas de la parte central de una probeta cilíndrica de 15x30 cm para garantizar su uniformidad.

El acondicionamiento de la probeta para el ensayo se realiza siguiendo las directrices que marca la Norma *UNE 83982:2006*, así la superficie lateral de las probetas ha sido revestida de parafina como impermeabilizante, con el fin de garantizar que la penetración de agua se lleve a cabo por la parte inferior en contacto con el agua.



Fig. 84 Ensayo de absorción por capilaridad.

Las mediciones de la masa de las probetas las determinamos a diferentes intervalos de tiempos (Q_x) 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 24h, 48h, 72h, 96h, hasta que la diferencia de pesadas espaciadas 24 h sea inferior a 0,1% y se calcula la cantidad de agua absorbida por diferencia entre Q_x y el valor inicial de peso Q_0 (Fig. 85).

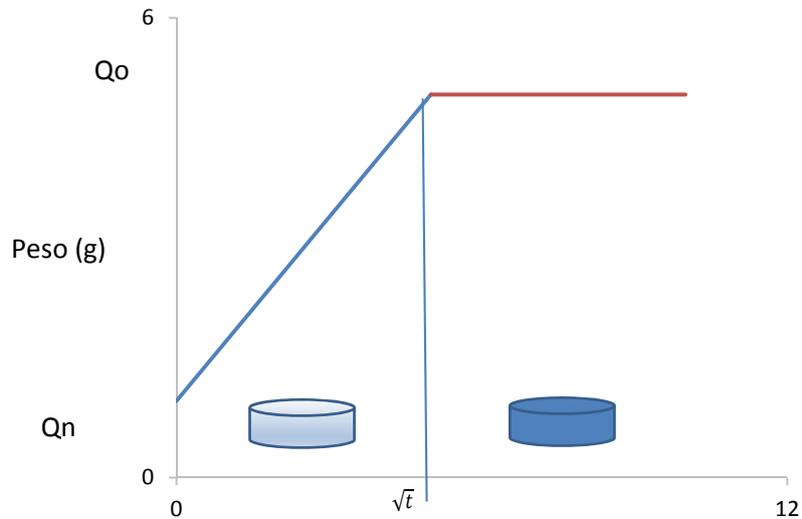


Fig. 85 Curva típica de la absorción del agua por capilaridad del hormigón endurecido, en función de la raíz cuadrada del tiempo.

El cálculo del coeficiente de absorción por capilaridad (K en $\text{kg/m}^2\text{min}^{0.5}$) especificado en la norma viene dada por la expresión (31):

$$K = \frac{\delta_a - \varepsilon_e}{10\sqrt{m}} \quad (31)$$

Siendo (32 y (33):

$$\varepsilon_e = \frac{Q_n - Q_o}{A \cdot h \cdot \delta_a} \quad (32)$$

$$m = \frac{t_n}{h^2} \quad (33)$$

Donde:

δ_a densidad del agua considerada 1 g/cm^3 .

ε_e porosidad efectiva del hormigón.

m resistencia a la penetración del agua por absorción capilar (min/cm^2).

A sección de la probeta.

h espesor en cm.

3.4.3.3. Penetración de agua bajo presión

Este ensayo se realiza conforme a la norma UNE-EN 12390-8⁴²⁰. El equipo que también posee el laboratorio de materiales de la Escuela Politécnica es de la marca PROETI SA y modelo HO 330 utilizando probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura, con una edad de curado de las mismas de 28 días.

El tiempo de exposición al ensayo es de 72 horas con una presión de 5 Bar. Transcurrido el periodo de exposición se rompen longitudinalmente mediante el ensayo de tracción indirecta, marcando el perímetro de penetración de agua en la base (Fig. 86).



Fig. 86 Ensayo permeabilidad bajo presión sobre tres probetas. Foto derecha medición de las profundidades de penetración.

3.4.3.4. Densidad

Para determinar la densidad se utilizara la norma UNE-EN 12390-7⁴²¹.

Se ha determinado la densidad en condiciones de recepción, saturada y seca, como relación entre la masa y su volumen.

3.4.3.5. Velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos

La determinación de la velocidad de impulsos de ondas longitudinales ultrasónicas en el seno de muestras de los distintos tipos hormigones, de control y reciclados con diferentes grados de sustitución, es el objetivo fundamental que se pretende con este ensayo. Esto nos permitirá relacionar esta velocidad con las propiedades físicas y mecánicas de los mismos. Además servirá de contraste para comprobar la variación

⁴²⁰ UNE-EN-12390-8 (2006). Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Ensayo de permeabilidad al agua bajo presión.

⁴²¹ UNE-EN-12390-7 (2009). Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7 Densidad hormigon endurecido.

antes y después de los ensayos de durabilidad. Los ensayos se han llevado a cabo siguiendo las directrices de la norma europea UNE-EN-12504-4:2006⁴²²

El aparato utilizado consiste en un generador de impulsos ultrasónicos, un amplificador, dos palpadores y un temporizador electrónico para la medida del intervalo de tiempo transcurrido entre el comienzo de la onda del impulso generado en el palpador generador y el comienzo de la onda a su llegada al palpador receptor.

El procedimiento de acoplamiento de los palpadores sobre las caras de la probeta en las zonas más lisas posible con la ayuda de un medio intermedio como pasta de glicerina.

Las transmisiones directas de velocidad de impulsos ultrasonidos se debe calcular por la fórmula (34):

$$V = \frac{l}{t} \quad (34)$$

Donde

V velocidad del impulso.

l longitud de la trayectoria.

t tiempo que invierte el impulso es su trayectoria.

3.4.3.6. Evaluación microestructural

Al objeto de poder identificar alguna singularidad en la interfase árido–pasta que pueda identificar diferencias en los hormigones reciclados con respecto a los de control, se prepararán muestras específicas según el ensayo.

3.4.3.6.1. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

El equipo de medida utilizado fue un FEM HITACHI S-4800 siendo la tensión de aceleración de 20 kV y la intensidad de corriente 20 μ A, la distancia de trabajo fue variable y el detector EDX Bruker XFlash-5030 con ventana de silíceo. El recubrimiento de las muestras se realizó con oro.

Las muestras seleccionadas se someten a fracturación mecánica y sobre las superficies de fractura se realizarán las observaciones (Fig. 87).

⁴²² EN-12504-4 (2004). Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos.



Fig. 87 Preparación de las muestras con recubrimiento metalizado en oro y Microscopio electrónico de barrido.

3.4.3.6.2. Difracción de rayos X (DRX)

Con el objetivo de determinar la composición mineralógica del cemento y del hormigón con árido reciclado se ha llevado a cabo el análisis mediante la técnica de difracción de rayos X, utilizando para ello un difractómetro PHILIPS PW1830, Fig. 88, capaz de identificar los componentes mineralógicos del hormigón patrón y con sustitución de árido reciclado del 100%.

Las muestras, trituradas en polvo, necesarias para el ensayo deben pasar por el tamiz 0,063 mm.



Fig. 88 Aparato de difracción rayos x situado en el centro I+D de la Universidad de Burgos.

3.4.3.7. Macroporosidad mediante Tomografía Axial Computarizada

La tomografía axial computarizada se utiliza para determinar cuantitativamente la macroporosidad de las muestras, es decir, los poros de tamaño superior a 170 μm . El equipo consta de un sistema de rayos X con un tubo Yxlon de 225 kV/30mA (Fig. 89) con cabina metálica de acero-plomo-acero, de forma que operando con una radiación máxima de 225 kV/30mA (dentro de la cabina), la dosis máxima de radiación a una distancia de 100 mm de su superficie externa no excede de 2,5 $\mu\text{S/h}$.



Fig. 89 Vista de la cabina, porta muestras y sala de control.

Las muestras extraídas para el ensayo son cilíndricas de radio no mayor que 10 cm o cúbicas sobre probetas de 7,5x7,5 cm y altura máxima 30 cm.

El software que regula el instrumental coordina el número, el espesor y número de secciones sobre la probeta considerada (Fig. 90).

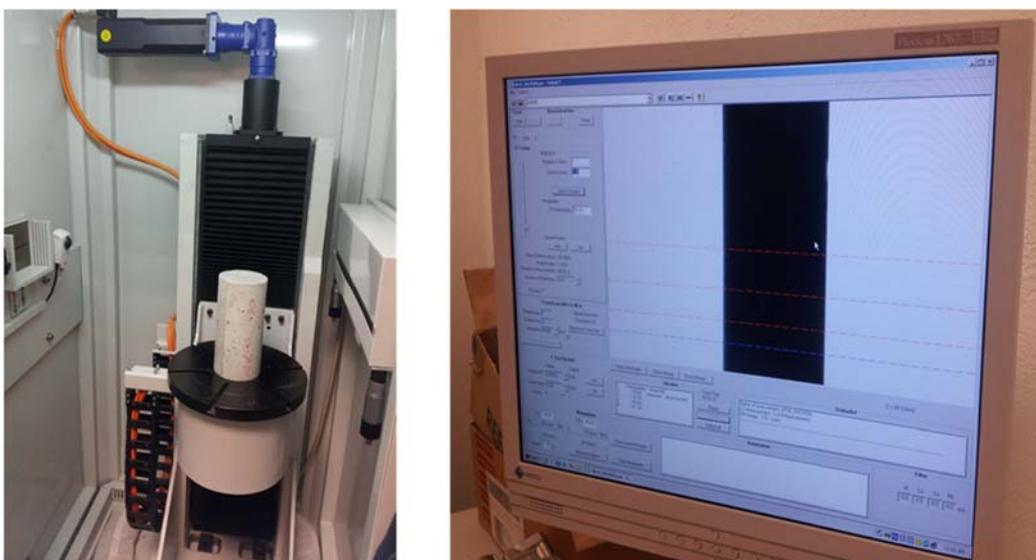


Fig. 90 Probeta y programación del número y espesor de las secciones transversales practicadas.

La metodología para la evaluación de la macroposidad de llevará a cabo mediante los programas VgsStudio Max⁴²³ y Mimics⁴²⁴. En el primero de ellos se realiza sobre probeta cilíndrica varias secciones correspondientes a sectores circulares para diferenciar y relacionar el volumen de poros desde el exterior al interior.

El fundamento de ambos programas de software resulta de aplicación para la interpretación de los TAC realizados sobre las probetas. Mediante esta técnica se puede determinar los poros de tamaño superior a 170 μm . Su fundamento es el filtrado en escala de grises (Fig. 91), cuya intensidad denota diferentes densidades. En nuestro caso la diferenciación fundamental consiste en aislar los poros, cuya tonalidad es más oscura debido a una menor densidad.

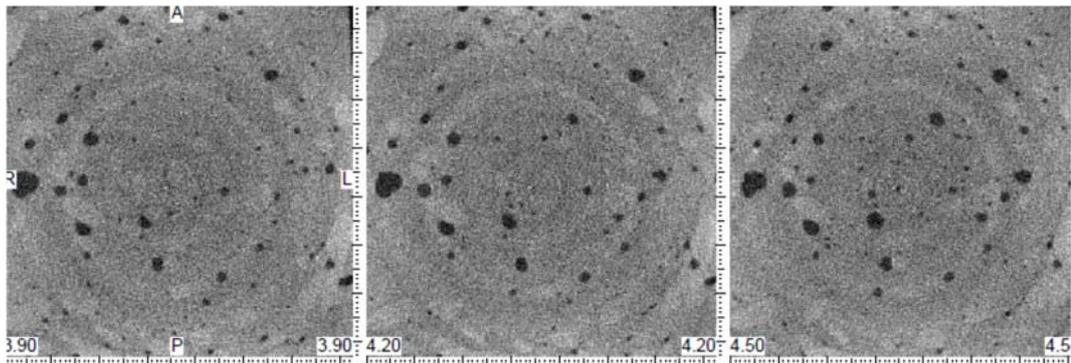


Fig. 91 Imágenes generadas por el escáner en escala de grises.

En la Fig. 92 se muestra la secuencia de obtención los diferentes componentes, filtrados por capas, el árido se representa en color verde, la pasta de cemento en color gris y los poros en color rojo.

⁴²³ Vgs Studio Max versión 2.2 High-end software for the visualization and analysis of industrial CT data

⁴²⁴ Mimics V 10.0. Materialises Interactive Medical Image Control System. Programa Informático de reconstrucción de geometrías y estructuras a partir de imágenes de resonancia Magnética (RM) y Tomografía Axial computarizada (TAC) Versión 10.0

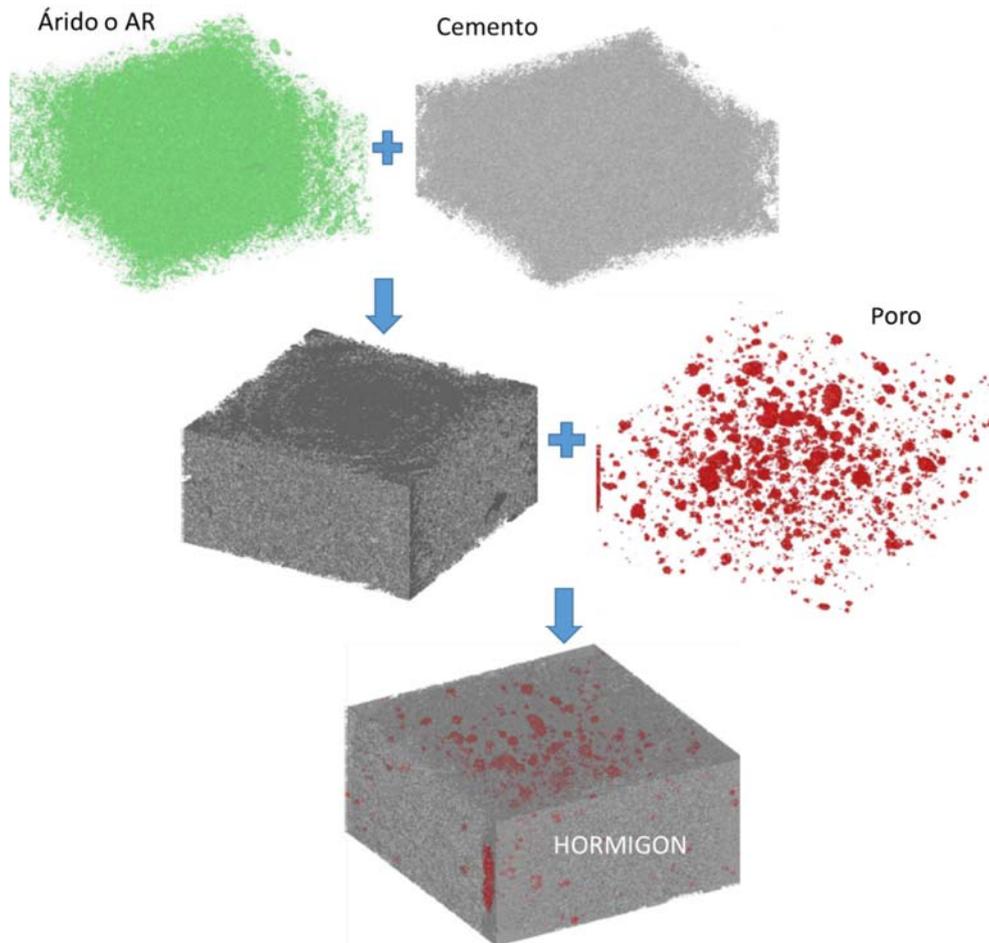


Fig. 92 Secuencia de obtención del hormigón por la suma de varias "máscaras" según densidad obtenida mediante el TAC y el programa Mimics.

3.4.3.8. Porosidad por intrusión de mercurio

La porosidad de los hormigones es una de las propiedades más importantes por la posible penetración de agentes agresivos al interior del material. El estudio de la estructura de los poros es fundamental para comprender la importancia de esta característica en el comportamiento físico mecánico.

La técnica PIM tiene limitaciones, puesto que considera poros cilíndricos, no tiene en cuenta cuellos de botella y en algunos casos resulta destructiva, produciéndose grietas y dando resultados erróneos. No obstante, en la mayoría de los casos, aporta información muy valiosa sobre la estructura de los materiales.

La determinación de la porosidad mediante porosimetría por intrusión de mercurio (PIM), analiza los microporos del material. El procedimiento operativo comienza realizando el vacío sobre las muestras, para posteriormente aplicar una presión hidrostática con mercurio a la cámara que contiene la muestra. La presión por intrusión de mercurio resulta inversamente proporcional al tamaño de abertura del

poro, los valores de presión aplicada y el volumen de mercurio intrusado, dan lugar a representaciones gráficas del proceso de llenado, lo que permite representar los volúmenes acumulativos, diferenciales y porosidad porcentual estimada a partir de la ecuación de Washburn que supone volúmenes cilíndricos de poros. La ecuación de Washburn describe el equilibrio entre las fuerzas internas y externas de un sistema trifásico sólido-líquido-vapor.

Los parámetros fundamentales que se obtienen en la PIM son tres: la porosidad total, el diámetro del poro y la distribución de la estructura porosa. La porosidad total es el volumen de poros respecto del volumen total, donde solo se tienen en cuenta los poros que están conectados, según la expresión (35):

$$P_t = \frac{V_p}{V_m} \times 100 \quad (35)$$

Siendo:

P_t porosidad total (%).

V_p volumen de poros (mm^3).

V_m volumen de material (mm^3).

El diámetro promedio del poro es el diámetro correspondiente asumiendo una distribución cilíndrica equivalente, y se determina según la ecuación (36):

$$\phi = \frac{4V}{A} \quad (36)$$

Siendo:

ϕ diámetro poro medio.

V volumen de poros (mm^3).

A superficie del material.

3.4.4. Procesos físicos que afectan a la durabilidad del hormigón

3.4.4.1. Fisuración por retracción

Para el ensayo de retracción y atendiendo a la norma *UNE 83318:94*⁴²⁵ se han utilizado moldes prismáticos de 7,5x7,5x27,5 cm perforados lateralmente a los que se ha acoplado interiormente unas piezas metálicas, sujetas con un tornillo desde el exterior del molde.

Las probetas de hormigón se compactan según el método tradicional recogido en la norma *UNE 83313:90*, precaución durante la compactación de los extremos de las probetas para no tocar las piezas metálicas. Antes de desmoldar las probetas se retira el tornillo que fija la pieza. La terminación de estas piezas es en forma redondeada, por lo que la medida se fija en un único punto (Fig. 93).



Fig. 93 Molde de probetas 7,5x7,5x27,5 cm para ensayo retracción.

Se realiza una primera medición a la $\frac{1}{2}$ hora del desmolde tras un curado en agua a 20° C durante 28 días. Posteriormente las probetas se someten en condiciones de exposición directa a la intemperie. La Fig. 94 muestra las condiciones de curado de los hormigones expuestos a la intemperie de Burgos, extraídos de la central meteorológica ubicada en Villafria.

⁴²⁵ UNE-EN-83318 (1994). Ensayos del hormigón Determinación de los cambios de longitud.

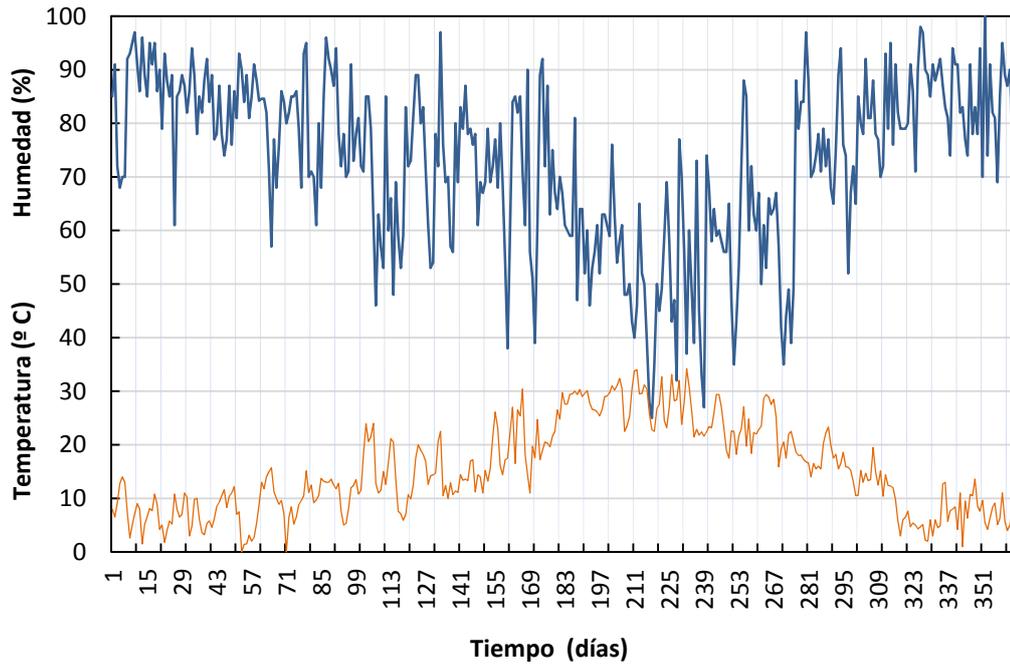


Fig. 94 Gráfico temperaturas y humedad durante el periodo de ensayo de las probetas a retracción.



Fig. 95 Ubicación de las probetas situadas en el patio anejo al laboratorio con ambiente tipo Ila y cuya grafica de temperaturas y humedades corresponde.

Bajo estas condiciones se realizan medidas de la longitud de las probetas a los 2, 7, 14, 28 días y 14, 28 y 48 semanas.

El micrómetro en el que se realizan las lecturas tiene una precisión de una micra y se tara mediante una galga al principio de cada lectura (Fig. 96).

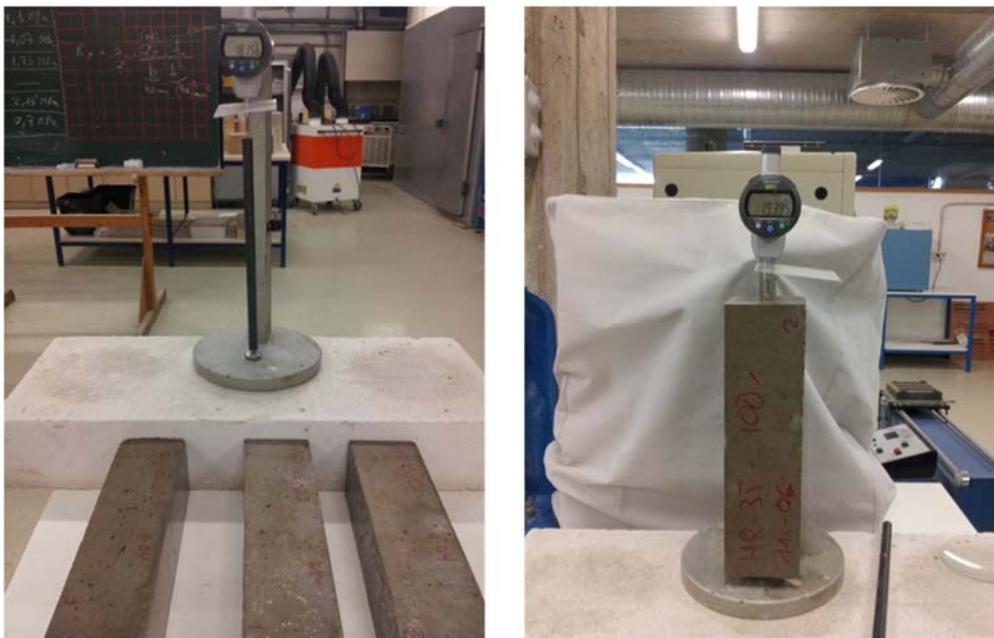


Fig. 96 Medición de las probetas mediante micrómetro. Foto izquierda galga. Foto derecha medición probeta.

La retracción de la probeta se calcula mediante la expresión (37):

$$\varepsilon_d = \frac{100x(l_f - l_0)}{l_0} \quad (37)$$

Siendo:

ε_d retracción.

l_f longitud de la base de medida a cada edad de ensayo.

l_0 longitud inicial de la base de medida tras el curado del hormigón.

Curado en exterior atendiendo a la actual Instrucción EHE-08 corresponde a un ambiente Tipo IIa.

La formulación que se ha tenido en cuenta para los análisis y comparativos que se efectuarán en el capítulo siguiente se refleja a continuación

Estimación de la retracción según la actual Instrucción EHE-08

La formulación de la instrucción EHE-08 establece la siguiente relación entre la retracción del hormigón y su resistencia característica, en función de la humedad, edad del hormigón y dimensión de las probetas.

La retracción de la probeta se calcula con la expresión (38):

$$\epsilon_d = \frac{100x(l_f - l_0)}{l_0} \quad (38)$$

Siendo l_f y l_0 las longitudes final e inicial respectivamente

La fórmula propuesta en la EHE-08 se compone de la expresión (39):

$$\epsilon_{ecs}(t, t_s) = \epsilon_{cso} \beta_s(t - t_s) \quad (39)$$

Siendo:

t edad del hormigón en el instante de evaluación.

t_s edad del hormigón al comienzo de la retracción.

Donde los valores expresados son dados por (40 y (41):

$$\epsilon_{eso} = \epsilon_s \beta_{HR} \quad (40)$$

$$\epsilon_s = (570 - 5f_{ck})10^{-6} \quad (41)$$

f_{ck} resistencia a compresión simple del hormigón

Por lo que (42) será:

$$\beta_{HR} = -1,55 \left[1 - \left(\frac{HR}{100} \right)^3 \right] \quad (42)$$

HR es la humedad relativa en porcentaje.

Y además (43):

$$\beta_s(t - t_s) = \sqrt{\frac{t - t_s}{0.035 \cdot e^2 + (t - t_s)}} \quad (43)$$

Siendo el espesor (44):

$$e = \frac{2A_c}{u} \quad (44)$$

A_c área de la sección transversal

u perímetro en contacto con la atmósfera

Las probetas utilizadas son prismáticas de 7,5 x 7,5 x 27,5 cm siendo el valor de e dado por (45):

$$e = \frac{2A_c}{u} = \frac{2 \times 75^2}{4 \times 75} = 37,5 \text{ mm} \quad (45)$$

Los valores $t - t_s$ corresponden a los períodos de mantenimiento especificados de 2, 7, 14 y 28 días y 6, 14, 28 y 48 semanas.

Según la formulación descrita, en la que el único parámetro que condiciona la retracción es la resistencia del hormigón, aquellos hormigones con mayor relación w/c son los que presentarán una mayor retracción. En diferentes estudios esto no se cumple así, resultando valores conservadores⁴²⁶.

Esto puede ser debido a que en la retracción influyen además otros parámetros como la naturaleza de los áridos o la relación árido/cemento, que cuando aumenta origina una reducción de la retracción, etc.

Estimación de la retracción según actual código ACI

La formulación propuesta por el ACI-209-92 es puramente empírica, basada en resultados experimentales y engloba en la misma la retracción autógena y de secado. Además tiene en cuenta parámetros de dosificación.

El modelo consta de una expresión hiperbólica donde se muestran las tasas de retracción en función del tiempo, con factores de corrección por efectos de humedad, asentamiento, contenido del aire, contenido de cemento, porcentaje de árido fino, tamaño y forma del elemento y edad de la carga.

Se pueden aplicar para cementos portland tipo I y tipo III con humedad relativa entre el 40% y 100%.

La fórmula fundamental expuesta en el ACI (sección 2-4), para elementos con curado normal, siendo $t_c > 7$ días, es la siguiente (46):

⁴²⁶ Sánchez, M. and Alaejos, P. (2012). Estudio sobre las propiedades del hormigón fabricado con áridos reciclados. Monografías CEDEX. M. d. Fomento. Madrid. **Monografías**: 220.

$$\epsilon_{sh}(t, t_c) = \frac{(t - t_c)}{f + (t - t_c)} (\epsilon_{sh})_u \quad (46)$$

Siendo:

t_c edad al inicio del secado

f constante de forma y tamaño, recomienda un valor de 35 o 55, tomaremos el primero para curado 7-28 días.

$(\epsilon_{sh})_u = 780 \gamma_{sh} 10^{-6} m/m$ valor que se descompone en las siguientes igualdades

El parámetro γ_{sh} representa el producto de una serie de factores de corrección (secciones 2.5 y 2.6 del ACI) que recogen la influencia de la humedad, porcentaje de finos, de cemento, espesor medio, etc (47)

$$\gamma_{sh} = \gamma_{\lambda} \gamma_{\psi} \gamma_{vs} \gamma_c \gamma_{\alpha} \quad (47)$$

De donde:

γ_{λ} Coeficiente que depende de la humedad relativa del ambiente:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{\lambda} &= 1.4 - 0.01\lambda \text{ para } 40 \leq \lambda \leq 80\% \\ \gamma_{\lambda} &= 3 - 0.03\lambda \text{ para } 80 \leq \lambda \leq 100\% \end{aligned} \right\} \text{Factor de humedad relativa del ambiente}$$

Coeficiente que depende del porcentaje en peso de elementos finos (48) y (49):

$$\gamma_{\psi} = 0,30 + 0,014 \psi \text{ para } \psi \leq 50\% \quad (48)$$

$$\gamma_{\psi} = 0,90 + 0,002 \psi \text{ para } \psi > 50\% \quad (49)$$

γ_{vs} Coeficiente que depende de la relación volumen/superficie (probeta) (50):

$$\gamma_{vs} = 1,2 \exp(-0.00472 \frac{v}{s}) \quad (50)$$

γ_c coeficiente que depende del contenido de cemento en kg/m^3 (51)

$$\gamma_c = 0,75 + 0,00061 c \quad (51)$$

γ_a coeficiente relacionado con el porcentaje de aire ocluido (52).

$$\gamma_a = 0,95 + 0,08 \alpha \quad (52)$$

Siendo α del valor el porcentaje de aire ocluido.

Después de aplicar todos estos factores, el valor último de retracción resulta estar comprendido entre 415 y 1070 μm .

Finalmente se compararán los resultados experimentales con los obtenidos mediante la aplicación de la formulación del ACI en el Capítulo 4, resultados y análisis.

3.4.4.2. Ciclos de hielo-deshielo

Se han realizado según la norma UNE-12390-9⁴²⁷, la cual describe el procedimiento para someter las probetas a ciclos de hielo-deshielo. Para ello, los medios disponibles son los siguientes:

- ✓ *Arcón congelador de 0,8 m³ con rango de temperaturas desde 0 a -35° C.*
- ✓ *Cajas metálicas de acero inoxidable de dimensiones 0,25x0,4x0,12 m de altura para alojamiento de las probetas de 0,10x0,10 m.*
- ✓ *Termómetro y galga de alojamiento con tres lecturas de marca y precisión.*
- ✓ *Recipiente de agua de 0,5 m³ con suplemento de resistencia con termostato para calentar agua a temperatura $\pm 20^\circ$ C.*
- ✓ *Bomba de circulación de agua para distribuir la temperatura.*

Se realizan mediciones de pesos antes de sumergir las probetas y a las 24 horas de su inmersión para posteriormente iniciar los ciclos diarios, Fig. 97.

También se toman datos de la velocidad de los impulsos ultrasónicos para control del envejecimiento debido a los ciclos.

⁴²⁷ UNE-EN-12390-9 (2006). Ensayos de hormigón endurecido. Parte 9: Ensayo de resistencia hielo-deshielo. Pérdida de masa superficial.



Fig. 97 Medición del peso de las probetas antes del ensayo (foto izquierda, medición de ultrasonidos antes del ensayo, foto centro, y termopares de medición de temperatura, foto derecha.

Para controlar la temperatura en el interior de la probeta se ha dispuesto de un taladro y alojamiento de la sonda mediante sellado con silicona en una de las probetas, pudiéndose controlar así el rango de temperaturas dispuesto en los apartados anteriores (Fig. 98).



Fig. 98 Preparación de los recipientes y de las muestras una de ellas mediante la sonda de temperatura.

El procedimiento detallado correspondiente a la Norma UNE 12390-9 supone:

- ✓ *Un periodo de 16 horas a temperatura de entre -13°C a -15°C en el arcón congelador.*
- ✓ *Un segundo estado o periodo de 8 horas en un rango de temperaturas uniforme desde -15° a $+20^{\circ}$ en un espacio de tiempo de 8 horas que se logra sumergiendo las cajas en un recipiente con agua controlando la temperatura desde -15° a 20° ayudado por la resistencia, y la bomba de circulación (Fig. 99).*

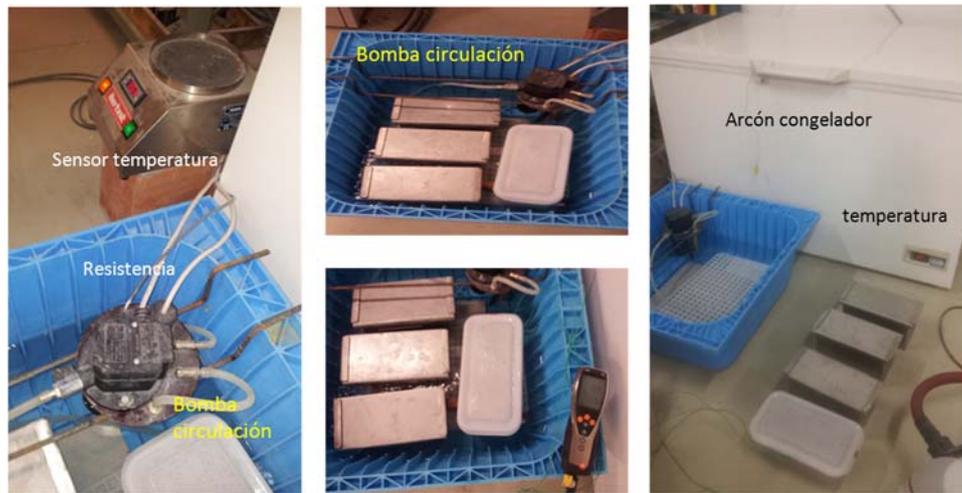


Fig. 99 Recipiente con agua donde se aloja la bomba de circulación y una resistencia para mantener la temperatura a 20° en los periodos hielo- deshielo.

Para ello se dispone y se sitúan las probetas con separadores a espacios de no más de 2 cm y se llena con una disolución de agua con sal común (NaCl) al 5% hasta que quede por lo menos 1 cm por encima de la probeta.

Los resultados de las mediciones de los termopares se realizaron controlando la temperatura interior de la probeta (previo taladro, alojamiento y sellado con silicona), temperatura del arcón congelador, durante varios días con el fin de estabilizar y cuadrar la curva teórica reflejada en la norma según gráfico (Fig. 100).

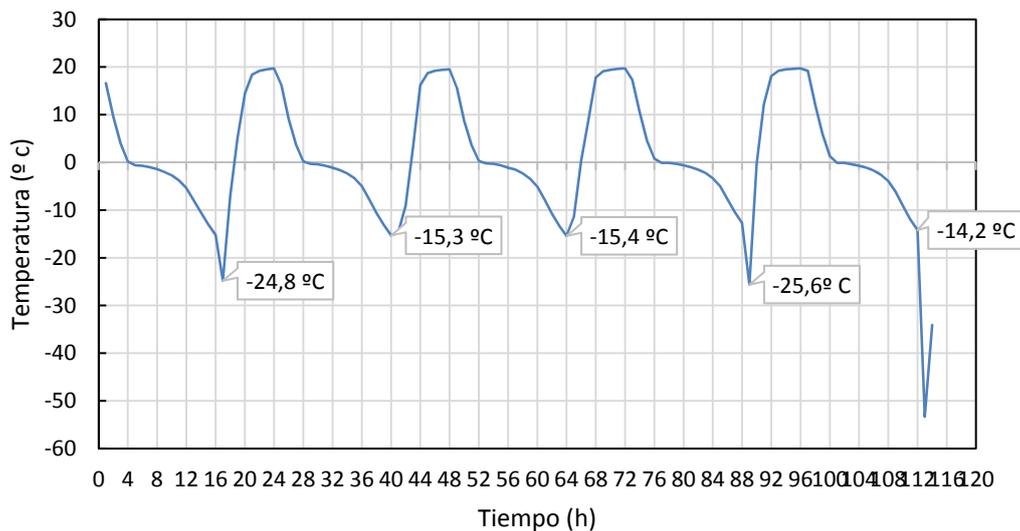


Fig. 100 Gráfica de tanteo durante 5 días con el fin de adaptar la curva teórica de la Norma UNE 12390.

El resultado real, una vez ajustado con los ciclos y temperaturas teóricas expuestas en la Norma UNE, se muestra en la Fig. 101.

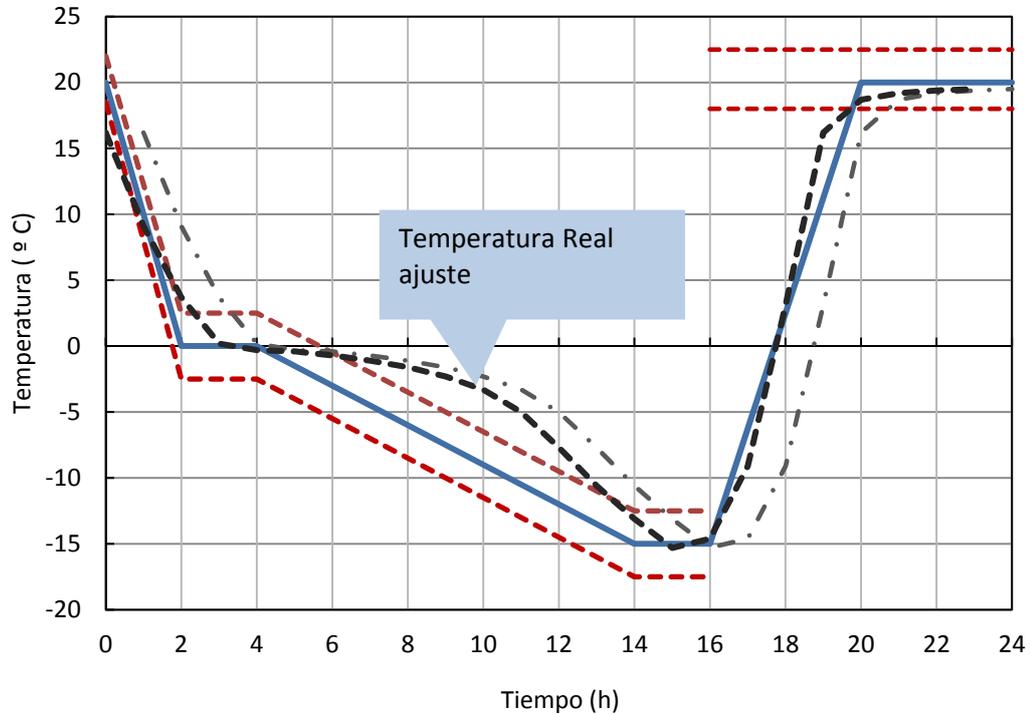


Fig. 101 Gráfica real de las temperaturas tomadas con las sondas y el termómetro digital con control de memoria.

Los ciclos se realizaron de lunes a viernes dejando los fines de semana y festivos las probetas en el arcón a una temperatura constante de -15°C .

Se han realizado 56 ciclos de hielo deshielo con el procedimiento descrito.

Se determinó la pérdida de masa a los 7, 14, 28, 42 y 56 ciclos renovando el agua.

En la Fig. 102 se muestra el raspado superficial como indica la Norma, para determinar la pérdida de masa. La masa desprendida de la probeta se guarda en pequeñas bolsas para su conservación y control.



Fig. 102 Raspado superficial con cepillo (foto izquierda), Termopar en una de las probetas, y foto derecha residuo de las probetas en los intervalos que marca la Norma.

Una vez terminados los 56 ciclos se vuelven a registrar los pesos y la velocidad de los impulso ultrasónicos. Las probetas se refrentan con el fin de ensayarlas a compresión (Fig. 103) y compararlas con las probetas de referencia pertenecientes a la misma amasada.



Fig. 103 Refrentado de las probetas después del ensayo y durante el ensayo a compresión.

3.4.4.3. Desgaste por abrasión

No existe norma UNE sobre el método de este ensayo para hormigones, por lo que ha sido necesario adaptar la norma UNE-EN-1341⁴²⁸, que describe el procedimiento para evaluar el comportamiento de la baldosas de piedra natural para uso como pavimento exterior sometida a desgaste por abrasión.

La máquina consta de una tolva en la que se rellena con abrasivo generalmente corindón, y un tornillo que fija la probeta, la cual debe permitir que la huella producida esté al menos a 15 mm de cualquier borde de la misma para que permita pasar el flujo de abrasivo por debajo. La marcha del disco giratorio de abrasión alcanzara 78 revoluciones en 60 ± 3 segundos, Fig. 104.

⁴²⁸ UNE-EN-1341 (2002). "Baldosas de piedra natural para uso como pavimento exterior: Requisitos y metodo de ensayo."

Se han empleado probetas de 10x10 cm para la medición sobre dos de sus caras para los hormigones catalogados como HR-30 y HR-45 con sustituciones de 0,20%, 50% y 100%.



Fig. 104 Máquina de abrasión empleada en el ensayo.

Para la medición de la huella se trazara con un lápiz de mina 0,5 mm y dureza 6H dibujando los límites longitudinales externos (I1 y I2) de la huella usando una regla.

La medición de la huellas se realiza con calibre, Fig. 105.



Fig. 105 Medición de huella mediante calibre.

3.4.4.4. Envejecimiento por choque térmico

El objetivo de este ensayo es conocer el efecto de los procesos relacionados con la saturación de agua y el secado del material procurando simular la alternancia de los días secos y lluviosos.

El procedimiento experimental consiste básicamente en ciclos alternos de inmersión en agua y secado a temperatura controlada. Cada ciclo de 24 horas incluye una etapa en que las probetas se sumergen totalmente en agua y otra etapa posterior en la que se introducen en una estufa para su secado (60-100° C). A

continuación, las probetas se dejan enfriar antes de la nueva inmersión en agua para completar el ciclo y evitar choques térmicos. Si no se incluye la etapa de enfriamiento, se pueden reproducir de forma más real las condiciones de lluvia (saturación de agua del material), secado (evaporación de esa agua) y calentamiento de la superficie del material. Considerando, por ejemplo, que la temperatura ambiente pueda ser de 30° C, de esta forma se evalúa conjuntamente el efecto de la humedad sequedad con el choque térmico sufrido por el material en esas condiciones.



Ante la falta de normativa específica se ha adaptado el ensayo de la norma UNE-EN14066⁴²⁹, específico de la piedra natural. Teniendo esto en cuenta, se han preparado probetas de 10x10 cm con proporciones 0%, 20%, 50%, 100% y se las somete a ciclos de 18 horas en horno a 105° C y periodo de 6 horas sumergidas en agua a temperatura de 20° C. El número total de ciclos, incluyendo las dos fases anteriormente descritas, es de 20. En la Fig. 106 se muestra el horno utilizado y la cubeta de inmersión de las probetas.



Fig. 106 Probeta en horno a 105 ° C en ciclo de 16 horas y recipiente con agua para ciclos de 8 horas sumergido.

El contraste que se realiza después de los ciclos es visual, observando la aparición de grietas, desconchamientos, etc. También se contrasta la posible pérdida de resistencia a partir de probetas conservadas como de referencia.

⁴²⁹ UNE-EN-14066:2014 (2014). Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia al envejecimiento por choque térmico.

3.4.5. Procesos químicos de alteración de la durabilidad del hormigón

3.4.5.1. Carbonatación natural

Se han mantenido las probetas correspondientes al ensayo de retracción durante el periodo de un año en el exterior. Las condiciones de humedad y temperatura son las mismas que las expuestas en el Apartado 3.4.4 en el apartado de curado de las probetas a retracción.

3.4.5.2. Carbonatación acelerada

Para la carbonatación acelerada se dispone del siguiente instrumental:

- ✓ *Cámara estanca sellada con incorporación de CO₂ mediante caudalímetro y sistema de purga de aire.*
- ✓ *Medidor de CO₂.*
- ✓ *Termómetro–higrómetro digital.*
- ✓ *Botella de CO₂ de 20 litros de capacidad.*

En la Fig. 107 se muestran el instrumental descrito, la entrada del CO₂ en la cámara mediante válvula inferior y el sistema de purga mediante válvula superior.



Fig. 107 Botella de CO₂ de capacidad 20 kg, cámara estanca adaptada e instrumentada, caudalímetro y sistema purga.

En la Fig. 108 se muestran los instrumentos de medición empleados como el termómetro-higrómetro para controlar las condiciones ambientales y el medidor de gases para controlar la concentración de CO₂.



Fig. 108 Termómetro e higrómetro de control y medidor CO₂

El proceso operatorio consistió en: la preparación de las probetas y curado durante 28 días en cámara. A continuación, medición del peso natural y medición mediante ultrasonidos de cada una de las probetas para obtener resultados al inicio y al finalización.

El proceso cronológicamente se enumera y describe a continuación:

- *Incorporación de las probetas dentro de la cámara separadas mediante unos separadores de PVC para que la cara inferior no esté en contacto con el suelo de la cámara.*
- *Incorporación del CO₂ con control de caudal y volumen según sistema reloj salida de la bombona. El caudal incorporado supone 15 l/min durante 2 minutos supone 20% de la capacidad máxima de la cámara es decir 0,20x140 litros=30 litros (140 litros totales que tiene de volumen la cámara) (Fig. 109).*
- *Comprobación mediante la sonda medidor de CO₂ que la concentración supera el 5% (medida máxima)*
- *Cada semana se repite el proceso previa apertura de la cámara y saneado del aire interior.*



Fig. 109 Medidor de presión y caudal en litros/minuto, medidor reloj derecho.

Una vez realizado el ensayo, los efectos producidos por la carbonatación se analiza según:

1.-La pérdida de masa medida en % en peso, después de finalizado el ensayo, y obtenida mediante la expresión (53):

$$\Delta M\% = \frac{M_0 - M_f}{M_0} \times 100 \quad (53)$$

Dónde:

M_0 masa inicial

M_f masa final

2.-La inspección visual de las probetas, anotando signos evidentes de degradación.

3.-La pérdida de resistencia mecánica controlada mediante el ensayo de compresión. A partir de la misma amasada se conservan probetas de referencia con el fin de comparar con los resultados de las probetas sometidas al ensayo.

4.-La medición de profundidad media de carbonatación mediante impregnación con fenolftaleína. Para ello se rompen las probetas colocando dos barras de acero con el fin de que se produzca cizalladura, consiguiendo una superficie lo más plana y regular. A continuación, retiramos el polvo residual y pulverizamos la disolución de fenolftaleína. Las áreas carbonatadas del hormigón no cambiarán de color mientras que las áreas con un pH > 9 adquirirán un color rosado brillante.

Para la medición de la profundidad del frente de carbonatación se sigue el siguiente proceso:

- Se realiza una foto con cámara digital de la manera más ortogonal posible.
- Se introduce en un programa de dibujo asistido por ordenador.

- Se retoca y escala a las dimensiones reales de 10x10 cm.
- Se introduce una polilínea que recoja todo el perímetro carbonatado.
- Se mide el área exterior mediante otra polilínea cuyo resultado contemplará las pequeñas diferencias con la medida de la probeta de 10x10 cm (A_1)
- Se calcula el área encerrada por esta polilínea (A_C).
- La profundidad media (P_M) será la raíz cuadrada de la diferencia del área total menos el área carbonatada o área equivalente de un cuadrado con las dimensiones de la profundidad media (54):

$$P_m = \sqrt{A_1 - A_C} \quad (54)$$

Los modelos de estimación de vida útil utilizados son los siguientes:

Estimación según la ley de Fick

Para la estimación de la edad de iniciación de la carbonatación se atiende a la ley de Fick⁴³⁰ (55):

$$c = K\sqrt{t} \quad (55)$$

Siendo:

c el recubrimiento del hormigón (mm).

K una constante que depende de varios factores como coeficiente difusor CO_2 , condiciones ambientales, etc., unidad empleada $mm/(año)^{0.5}$.

t el tiempo en años.

El ensayo de carbonatación acelerado realizado se basa en la aplicación de esta ecuación (55). Las probetas para nuestro caso han sido expuestas a una concentración de un 20% de CO_2 , valor notablemente superior al que se presenta en la atmosfera natural, donde la concentración de CO_2 es de 0,035 %.

Con la ecuación (56) y los valores de carbonatación obtenidos en el ensayo se ha calculado el tiempo t_{20} necesario para que la concentración CO_2 de 20% llegue al acero en una estructura prefabricada con recubrimiento de 20 o 25 mm.

$$\frac{t_{20}}{t_{0,035}} = \sqrt{\frac{C_{20\%}}{C_{0,035\%}}} \quad (56)$$

⁴³⁰Fick (Alemania1829). Adolf Eugen Fick. Ley de difusión.

t tiempo de iniciación.

C concentración de CO_2 en el ambiente.

Estimación según el modelo de carbonatación de la EHE-08

La estimación de la edad de inicio de la carbonatación a partir de los ensayos de carbonatación acelerada previstas en la vida útil de la EHE-08 son (57).

$$t_i = \left(\frac{d}{K_c}\right)^2 \quad (57)$$

Siendo:

d profundidad en mm.

t tiempo en años.

El coeficiente de carbonatación K_c puede obtenerse (58):

$$K_c = C_{env} C_{air} a f_{cm}^2 \quad (58)$$

C_{env} : coeficiente de ambiente.

C_{air} coeficiente de aireantes.

f_{cm} resistencia media a compresión (MPa).

a , parámetro en función del tipo de conglomerantes.

Estimación según el modelo Papadakis

El Modelo Papadakis^{431 432} propone la siguiente formula simplificada (9) para calcular las concentraciones de los constituyentes carbonatables y la porosidad de la pasta, utilizando relaciones agua/cemento (w/c), árido/cemento (a/c), la humedad relativa (HR) y donde c es la profundidad de carbonatación en mm

$$c = 350 \left(\frac{\rho_c}{\rho_w}\right) \frac{(w/c) - 0,3}{1 + (\rho_c/\rho_w)(\frac{w}{c})} \left(1 - \frac{HR}{100}\right) \left\{ \left[1 + \left(\frac{\rho_c}{\rho_w}\right) \frac{w}{c} + \frac{\rho_c}{\rho a} \left(\frac{a}{c}\right) \right] \gamma_{CO_2} t \right\}^{1/2} \quad (59)$$

⁴³¹ Papadakis, V., Vayena, C. and Fardis, H. (1992). "Fundamental Modeling and Experimental Factors and Cement-lime Mortar Coating on Concrete Carbonation." *Materials and Structures* **25**: 293-305.

⁴³² Papadakis, V. G., Fardis, M. N. and Vayenas, C. G. (1992). "Hydration and carbonation of pozzolanic cements." *Acı Materials Journal* **89**(2): 119-130.

Donde:

ρ_c densidad del cemento (kg/m^3).

ρ_w densidad del agua (kg/m^3).

ρ_a densidad de los áridos (kg/m^3).

t tiempo en años.

Y_{CO_2} concentración de CO_2 .

Estimación según el modelo de Parrott

El modelo de Parrott⁴³³ está basado en el coeficiente de permeabilidad al aire y la expresión matemática es (60):

$$X = 64 \cdot \frac{K^{0,4} \cdot t^n}{c^{0,5}} \quad (60)$$

Siendo:

X profundidad de carbonatación en metros.

K coeficiente de permeabilidad al oxígeno 10^{-16} m^2 .

t tiempo en años.

C material alcalino del hormigón expresado en kg de C_aO por m^3 .

El exponente n es 0,5 pero puede variar para ajustarlo a la humedad relativa, teniendo en cuenta que el coeficiente de permeabilidad se refiere a humedad relativa.

Despejando el valor del tiempo en la fórmula anterior se obtendrá (61):

$$t = n \sqrt{\frac{c^{0,5} \cdot x}{64 \cdot K^{0,4}}} \quad (61)$$

Introduciendo en la fórmula anterior el valor del recubrimiento se obtiene el valor de la vida útil.

⁴³³ Parrot, L. (1994). Design of avoiding damage due to carbonation-induced corrosion, in CANMET/ACI Conference on durability of concrete. Nice, France.

3.4.5.3. Ataque por ácidos. Ensayo de Kesternich

Para el ensayo Kesternich se siguió la Norma UNE ISO 6988⁴³⁴.

La resistencia al dióxido de azufre con condensación general se estima por inspección visual, pérdida de masa y pérdida de las resistencias mecánicas, una vez finalizado el ensayo.

El instrumental utilizado ha sido:

- ✓ *Cámara estanca con capacidad y forma para que la humedad que allí se condense no caiga sobre las muestras que se encuentren en el interior de la cámara, lográndose esto con una inclinación de 12° en relación al plano horizontal.*
- ✓ *Dispositivo de regulación de temperatura.*
- ✓ *Control de humedad al 60%.*
- ✓ *Fuente de dióxido de azufre.*
- ✓ *Tubería de alimentación de gas.*
- ✓ *Dispositivo de calentamiento.*
- ✓ *Extractor de humos.*

En la Fig. 110 se muestra el equipo de ensayo.

Se introducen las probetas en la cámara, previa medición de pesos Fig. 111, y medición de impulsos ultrasónicos, en la que se produce una humedad condensada con dióxido de azufre, manteniendo las condiciones durante 8 horas; seguidamente se secan las muestras a humedad ambiente durante 16 horas completando así un ciclo. El ciclo se repite durante 20 veces.

⁴³⁴ UNE-ISO-6988 (1985). "Ensayo de dióxido de azufre con condensación general de humedad (DIN 50018)."



Fig. 110 Cámara de gases y dispositivo de medición del SO_2 .



Fig. 111 Preparación probetas y medición de pesos antes de entrada en la cámara.

El envejecimiento por dióxido de azufre con humedad condensada se evalúa por tres procedimientos:

1.-La pérdida de masa en porcentaje de la probeta, después de realizado el ensayo, mediante la expresión (62):

$$\Delta M\% = \frac{M_0 - M_f}{M_0} \times 100 \quad (62)$$

Donde:

M_0 masa inicial.

M_f masa final.

2.-Inspección visual de las probetas, anotando signos evidentes de degradación o alteración.

3.-La variación de resistencia mecánica por compresión comparando con probetas de las misma amasada de referencia. También se comparan la velocidad de impulsos ultrasónicos antes y después del ensayo.

3.4.5.4. Envejecimiento por inmersión en agua, sulfatos y agua de mar

El objetivo de este ensayo es comparar el comportamiento del hormigón, desde el punto de vista de la durabilidad analizando cómo le afecta la inmersión en diferentes fluidos susceptibles de alterar sus propiedades y compararlas con los diferentes grados de sustitución 0%, 20%, 50% y 100%.

En el ensayo realizado en cada uno de los ambientes se ha seguido el mismo procedimiento:

- ✓ *Ciclos de humedad sequedad con agua potable.*
- ✓ *Ciclos de humedad sequedad por ataque por sulfatos.*
- ✓ *Ciclos de humedad sequedad por ataque de agua de mar.*

La característica común es que las probetas sufren los mismos ciclos diferenciando en cada caso la disolución en que se sumergen es distinta.

Para evaluar la durabilidad se han ido efectuando mediciones de peso cada 21 días observándose su alteración en el tiempo.

La metodología que se siguió fue por tanto realizar 9 ciclos de 19 días en los que la probeta permanecía⁴³⁵:

- *5 días sumergidos.*
- *2 días de secado.*
- *5 días sumergidos.*
- *2 días de secado.*
- *5 días sumergidos.*
- *Medición de peso saturado sobre superficie seca y sumergida.*

Las probetas se mantuvieron 28 días en cámara húmeda (20° C y 95% humedad) antes de iniciar los ciclos.

Para mantenerlas sumergidas durante el periodo de tiempo (9x19=171 días) que ha durado el ensayo se han empleado recipientes estancos con protección exterior, nivel de líquido de 2 cm superiormente, reponiendo éste si era necesario.

⁴³⁵ Los ciclos coinciden en tres semanas, de las cuales cada una se divide de lunes a viernes sumergido y fin de semana secado.

El peso de las probetas se ha medido mediante balanza de precisión de resolución 0,1 gramos. Para la medición de pesos saturados con superficie seca se ha secado la superficie con una toalla previamente humedecida con el fin de que sea lo más homogéneo posible.

En todos los casos se efectuará un comparativo atendiendo a los siguientes parámetros:

1.-La pérdida de masa en porcentaje de la probeta respecto al primer ciclo, después de realizado el ensayo, se obtiene mediante la expresión (63):

$$\Delta M\% = \frac{M_0 - M_{fi}}{M_0} \times 100 \quad (63)$$

Donde:

M_0 masa inicial correspondiente al primer ciclo.

M_{fi} masa final de cada ciclo i

2.-Inspeccion visual de las probetas, anotando signos evidentes de degradación.

3.-La pérdida de resistencia mecánica comparada con probetas de referencia pertenecientes a la misma amasada y ensayo de velocidad de impulsos ultrasónicos antes y después del ensayo

3.4.5.5. Ciclos de humedad-sequedad con agua potable

Para ello se ha utilizado agua potable procedente de la red que abastece al laboratorio. En la Fig. 112 se refleja la balsa de alojamiento de las probetas en agua potable.

En este ensayo se simula la acción de los ciclos con humedad por inmersión secado que se pueden producir en cualquier elemento de hormigón sometido a contacto directo con el agua o expuesto a la intemperie.



Fig. 112 Recipiente de alojamiento de probetas sometido a los ciclos humedad-sequedad.

3.4.5.6. Ciclos de humedad-sequedad por ataque de agua de mar

El ensayo se realizó con agua de mar procedente de Santander empleando un recipiente de 2 m³.

El ambiente marino y la acción del agua de mar suponen un ambiente agresivo para el hormigón que la normativa española de hormigón estructural EHE-08 cataloga como ambiente agresivo tipo III.

El ensayo realizado es el más desfavorable pues es el equivalente al que sufren los materiales de la carrera de las mareas donde se intercalan periodos de humedad sequedad.

La descomposición química del cemento hidratado en exposición directa a ambiente marino puede producirse por:

- ✓ *Ataque por CO₂.*
- ✓ *Ataque del ión Mg.*
- ✓ *Ataque por sulfatos (SO₄).*
- ✓ *Procesos físicos de abrasión.*
- ✓ *Crecimiento biológico.*

Los componentes agresivos del agua de mar para el hormigón en masa son CO₂, MgCl₂ y MgSO₄.

3.4.5.7. Ciclos de humedad-sequedad con sulfatos

El ataque por sulfatos constituye una de las formas más extensas y difundidas de agresión química del hormigón.

Ejemplos de ámbitos propicios son:

- ✓ *Sulfatos presentes en el suelo y/o disueltos en el agua de las capas freáticas.*
- ✓ *En el agua de mar.*
- ✓ *En ambientes de descomposición orgánica, procesos anaerobios donde se forma H₂S compuesto que puede transformarse posteriormente en ácido sulfúrico (H₂SO₄) por acción bacteriológica.*
- ✓ *Ambientes urbanos o industrializados, con altos grados de polución ambiental (lluvia ácida).*
- ✓ *Procesos biológicos que degradan lentamente al hormigón, incluso en aquellas estructuras que no se hallan en contacto directo con el suelo.*

El efecto del ataque por sulfatos se atribuye a la formación de etringita expansiva y al yeso, que precipitan por un mecanismo de disolución-precipitación.

Los iones de sulfato que penetran en el hormigón tienen mayor afinidad para reaccionar con la porlantidita (CH), que se forma como una de las fases principales del cemento durante el proceso de hidratación. Como resultado de esta reacción se forma yeso (CaSO₄.H₂O) según la reacción siguiente:



El yeso así liberado reacciona con el aluminato tricálcico (C₃A) formando etringita sulfoenriquecida e insoluble.



La disolución empleada para el ensayo es de sulfato potásico (K₂SO₄) al 5%, para lo cual se han preparado recipientes con dicha disolución y se ha operado de la misma forma que en los apartados anteriores (Fig. 113).



Fig. 113 Recipiente alojamiento agua con sulfatos para realización ciclos humedad-sequedad.

3.5. PLANIFICACIÓN DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL

3.5.1. Ensayos sobre el hormigón

3.5.1.1. Propiedades mecánicas

En la Tabla 54 se enumeran los ensayos, normas aplicadas, edad, dimensiones de las probetas correspondientes y número de probetas por dosificación y sustitución para la fase 1 y número de probetas para las dosificaciones 0-100% y para la fase 2.

Tabla 54 Programación ensayos mecánicos.

Fase	Ensayo	Norma	Edad (días)	Nº probetas	Forma y dimensión
1º	Ensayo compresión	EN 12390-3	7	3	Cubos 100x100x100 mm
			28	3	Cubos 100x100x100 mm
			180	3	Cubos 100x100x100 mm
2º		EN 12390-3	28	3	Cubos 100x100x100 mm
1º	Ensayo tracción indirecta	EN 12390-6	28	3	Cilindros 150Φx300 mm
			180	3	Cilindros 150Φx300 mm
2º		EN 12390-6	28	3	Cilindros 150Φx300 mm
1º	Ensayo flexocompresión	EN-12390-5	28	3	Prismáticas 100x4000
			180	3	Prismáticas 100x4000 mm
1º	Módulo elasticidad estático	EN 12390-3	28	3	Cilindros 100Φx200 mm
1º	Módulo elasticidad dinámico	EN 12390-3	28	3	Cilindros 150Φx300 mm

3.5.1.2. Propiedades físicas y mecanismo de transporte con influencia en la durabilidad

En la Tabla 55 se describen los ensayos, normas aplicadas, edad, dimensiones de las probetas correspondientes y número de las mismas por dosificación y sustitución para la fase 1 y probetas número de probetas para la dosificación menor para 0-100% para la fase 2 con áridos presaturados.

Tabla 55 Programación ensayos relativos a las propiedades físicas y mecanismos de transporte.

Fase	Ensayo	Norma	Edad (días)	Nº probetas	Forma y dimensión	
1º	Ensayo absorción	EN-1339	7	3	Cubos 100x100x100 mm	
			ASTMC-642	28	3	Cubos 100x100x100 mm
				180	3	Cubos 100x100x100 mm
2º	Ensayo absorción	EN-1339	28	3	Cubos 100x100x100 mm	
1º	Ensayo capilaridad	EN-83982	28	3	Cilindros 150Φx300 mm	
			180	3	Cilindros 150Φx300 mm	
2º	Ensayo capilaridad	EN-83982	28	3	Cilindros 150Φx300 mm	
1º	Ensayo penetración	EN-12390	28	3	Cilindros 150Φx300 mm	
2º	Agua bajo presión	EN-12390	180	3	Cilindros 150Φx300 mm	
1º	Velocidad impulsos ultrasónicos	UNE-12504-4	28	8	Cilindros 150Øx300 mm	
1º	Microscopía electrónica		28	2	Cilindros 100Øx150 mm	
			28	4	Cubos 10x10x10 mm	
1º	Tomografía TAC		28	4	Cilindros 100Φx200 mm	
			28	2	Prismas 75x75x275 mm	
1º	Porosidad intrusión de mercurio		28	2	Prismas 75x75x275 mm	

3.5.1.3. Propiedades de durabilidad

En la Tabla 56 se describen los ensayos que determinan las propiedades físicas que influyen en la durabilidad, normas aplicadas, edad dimensiones y número de probetas por dosificación y sustitución para la fase 1 y probetas número de probetas para la dosificación de 0-100% para la fase 2.

Tabla 56 Programación de ensayos que determinan las propiedades físicas que influyen en la durabilidad.

Fase	Ensayo	Norma	Edad (días)	Nº probetas	Forma y dimensión
1º	Ensayo densidad	EN 12390-7	7	3	Cubos 100x100x100 mm
			28	3	Cubos 100x100x100 mm
2º		EN 12390-7	28	3	Cubos 100x100x100 m
1º	Ensayo retracción	UNE-83318:94	28	3	Prismas 75x75x275 mm
			28	3	Prismas 75x75x275 mm
			7	3	Prismas 75x75x275 mm

Fase	Ensayo	Norma	Edad (días)	Nº probetas	Forma y dimensión
2º	Ensayo retracción	UNE-83318:94	28	3	Prismas 75x75x275 mm
	Retracción + Aditivo reductor		28	3	Prismas 75x75x2,5 mm
1º	Ensayo hielo-deshielo	EN-12390-5	28	2	Cubos 100x100x100 mm
1º	Choque térmico-humedad sequedad	EN 12390-3	28	3	Cubos 100x100x100 mm
1º	Abrasión	EN-1341	28	2	Cubos 100x100x100 mm

3.5.1.4. Resistencia a los agentes químicos

En la Tabla 57 se refleja los ensayos que determinan la resistencia del hormigón a los distintos agentes químicos que inciden en la durabilidad, para los ensayos referenciados con procedimiento de amasado en condiciones de laboratorio fase 1.

Tabla 57 Programación ensayos durabilidad referente a las acciones químicas.

Fase	Ensayo	Norma	Edad (días)	Nº probetas	Forma y dimensión
1º	Ensayo carbonatación	Natural	360	3	Prismas 75x75x275 mm
		Acelerada	56	3	Cubos 100x100x100 mm
1º	Ensayo kesterlinch	ISO-6988	28	2	Cubos 100x100x100 mm
1º	Ensayo ciclos humedad-sequedad agua potable		28	3	Cubos 100x100x100 mm
			28	3	Cubos 100x100x100 mm
1º	Ensayo ciclos humedad-sequedad agua de mar		28	2	Cubos 100x100x100 mm
1º	Ensayo ciclos humedad sequedad en sulfatos		28	2	Cubos 100x100x100 mm

3.5.1.5. Prueba industrial

La prueba industrial se ha realizado en las instalaciones de la factoría ARTEPREF

En la Tabla 58 se indica número de probetas para la dosificación de menor w/c (HR-45) y sustituciones 0-100%. El procedimiento de amasado corresponde a áridos reciclados secos.

Tabla 58 Programación de la prueba industrial.

Fase	Ensayo	Norma	Edad (días)	Nº probetas	Forma y dimensión
1º	Ensayo compresión	EN 1239	7	3	Cubos 100x100x100 mm
			28	3	Cubos 100x100x100 mm
1º	Ensayo tracción	EN 12390-6	28	3	Cilindros 150Φx300 mm
1º	Ensayo densidad	EN-12390-5	28	3	Cubos 100x100x100 mm
1º	Absorción	ASTMC-642	28	3	Cúbicas 100Φx150 mm
1º	Penetración agua presión	EN-12390	28	3	Cilindros 150Φx300 mm
1º	Retracción	UNE-83318:94	28	3	Prismáticas 75x75x275 mm

Los ensayos realizados en vigas corresponden a las vigas de referencia para la dosificación $a/c=0,35$ (HR-45) y sustituciones 0-100%, Tabla 59.

Tabla 59 Ensayos de vigas prefabricadas para la prueba industrial.

Fase	Ensayo	Edad (días)	Nº probetas	Forma y dimensión
1º	Vigas a flexión	28	2	Viga 12x24 cm. y L=1,5 m
1º	Vigas a flexión cortante	28	2	Viga 24x24 cm y L=1,0 m
1º	Deformación diferida	28	2	Viga 12x24 cm y L=1,5 m

3.6. CONCLUSIONES

Uno de los objetivos del presente trabajo ha sido en el aprovechamiento de los elementos no utilizables de hormigón prefabricado de una empresa perteneciente al sector de la construcción e incorporarlos de nuevo al proceso de fabricación. La política de una empresa moderna que conjuga la tecnología hormigón, la calidad de sus productos y los criterios medioambientales, aprovechando sus recursos, reutilizando sus residuos y consiguiendo nuevos productos con prestaciones exigidas, ha sido uno de los objetivos conseguidos en el presente trabajo.

Prácticamente se puede aprovechar, mediante los diversos procesos de obtención del árido reciclado empleado, todos los elementos prefabricados que la fábrica posee en su almacén de productos rechazados, tanto armados como pretensados. Solamente el panel autoportante aligerado, requeriría de un proceso específico para eliminar el poliestireno expandido unido al hormigón.

Las propiedades del nuevo árido son adecuadas para la fabricación de un nuevo hormigón resultando un buen material con buena resistencia, uniformidad y poca contaminación.

A partir de la procedencia ya conocida y de los análisis de las propiedades geométricas, dimensionales, físicas, mecánicas y químicas del nuevo árido obtenido, podemos afirmar que éstos se encuentran dentro de los límites preceptivos de la actual instrucción EHE-08, obteniéndose unas propiedades adecuadas para el nuevo hormigón. Solamente destacar que la proporción de mortero adherido está por encima de la media, dado que proviene de un hormigón autocompactante con un mayor volumen de pasta.

La incorporación del árido reciclado, sobre todo para la sustitución de un 100%, supone una disminución de la trabajabilidad, amortiguada por el aumento de la cantidad de aditivos, debido a la absorción del árido reciclado. Con la presaturación de los áridos se evita este fenómeno si bien se ha de prestar especial atención a la mayor relación agua/cemento efectiva.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. INTRODUCCIÓN

La finalidad de la tesis es determinar la idoneidad de la incorporación de árido reciclado en elementos prefabricados de hormigón autocompactante, procedente de los residuos y rechazos de la misma planta de prefabricados. Para ello se realizará una caracterización completa del árido reciclado y, posteriormente, se analizarán las propiedades mecánicas del hormigón reciclado fabricado con ellos. Seguidamente se estudiarán y analizarán las propiedades físicas y mecanismos de transporte que pueden afectar a la durabilidad y frente a las acciones químicas. Se completará el análisis con la comprobación a nivel industrial de los aspectos antes descritos, examinando incluso diferentes piezas prefabricadas elaboradas con los hormigones objeto del presente estudio.

4.2. ENSAYOS REALIZADOS AL HORMIGÓN

4.2.1. Consistencia del hormigón en estado fresco

Para las amasadas realizadas en laboratorio se han realizado ensayos de consistencia por escurrimiento, adecuado para los hormigones autocompactantes. Los resultados de las consistencias del hormigón autocompactante, tomadas de diferentes amasadas, se adjuntan en Tabla 60.

Tabla 60 Ensayos de consistencia realizados sobre diferentes amasadas.

	HR-30- 0% (Control)	HR-30- 20%	HR-30- 50%	HR-30- 100%	HR-45- 0% (Control)	HR-45- 20%	HR-45- 50%	HR-45- 100 %
D (cm):	68	60	58	55	75	71	60	65

D: Diámetro de la torta resultante

El tiempo T_{50} para todos los ensayos resultaron menor a 8 segundos. Las proporciones de aditivos para las sustituciones de 50% y 100%, debido a la absorción de agua de los AR, fueron aumentadas. Aun así se observa que los valores de diámetro de la torta son menores para estas proporciones. Si se atiende al apartado 31.5 del Anejo 17 de la EHE-08 "Recomendaciones para la utilización del hormigón autocompactante", la fluidez reflejada en el ensayo de escurrimiento está dentro de los parámetros recomendables. En referencia a la posible segregación se

observó en todos los ensayos, la distribución uniforme y homogénea del árido grueso y ningún tipo de segregación ni exudación en el perímetro de la “torta”.

4.2.2. Propiedades mecánicas del hormigón

4.2.2.1. Resistencia a compresión

En la Tabla 61 se muestran los resultados de resistencia de los hormigones HR-30 y HR-45 con sustitución de 0%, 20%, 50% y 100% para la edad de 7, 28 y 180 días.

Tabla 61 Resultados ensayos de compresión.

TIPO HR	Edad	Resistencia a compresión (MPa)		
		7 Días	28 Días	180 Días
HR-30-0% (Control)		47,10	49,09	50,05
HR-30-20%		44,87	49,98	50,51
HR-30-50%		44,42	55,34	56,52
HR-30-100%		51,75	56,75	57,32
HR-45-0% (Control)		57,56	63,36	72,25
HR-45-20%		60,61	64,13	73,05
HR-45-50%		63,51	66,82	72,05
HR-45-100%		63,90	72,81	77,49

Como ya se ha expuesto anteriormente, las propiedades en este caso las referidas a la compresión, son sustancialmente superiores a las del hormigón de control.

Es conocido que el comportamiento de la resistencia a compresión en función de la relación agua/cemento, atendiendo a varios estudios ⁴³⁶ ⁴³⁷, se ajusta a una curva exponencial cuya formulación es (64):

$$y = Ae^{-B\left(\frac{w}{c}\right)} \quad (64)$$

Donde y es igual a la resistencia a compresión simple para la edad considerada y w/c es la relación agua/cemento efectiva, A y B son parámetros a calcular. Considerando los resultados obtenidos, se calculan los parámetros correspondientes. En las Fig. 114, Fig. 115, Fig. 116 se muestran las curvas de resistencia a

⁴³⁶ Carlos de la Peña.

⁴³⁷ Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A. and Alaejos, P. (2013). "Durability of recycled aggregate concrete." *Construcción and Building Material* **40**: 1054-1065.

compresión de los distintos hormigones reciclados frente a la relación agua/cemento efectiva a las edades de 7, 28 y 180 días y las curvas obtenidas mediante (64).

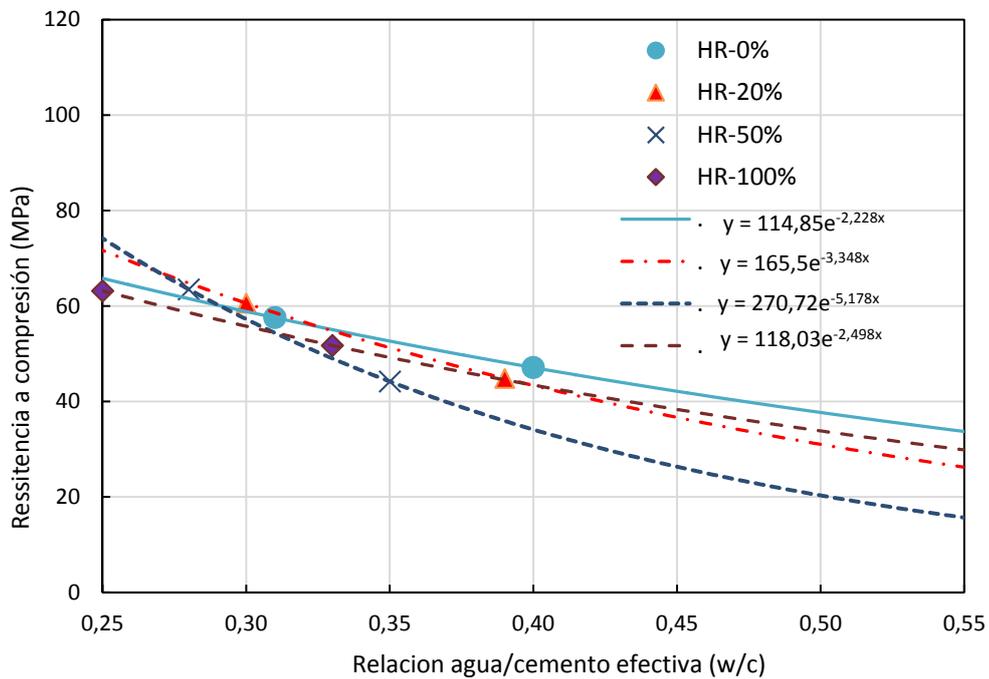


Fig. 114 Resultados de ensayo a compresión frente a la relación agua/cemento efectiva a los 7 días.

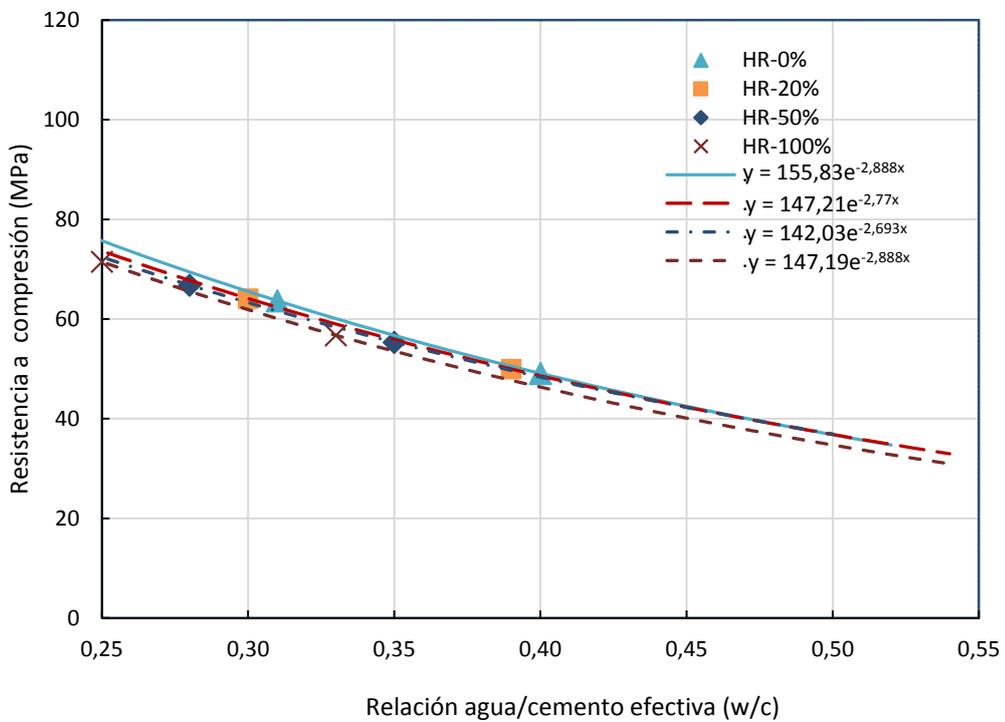


Fig. 115 Resultados de ensayo a compresión para la edad 28 días.

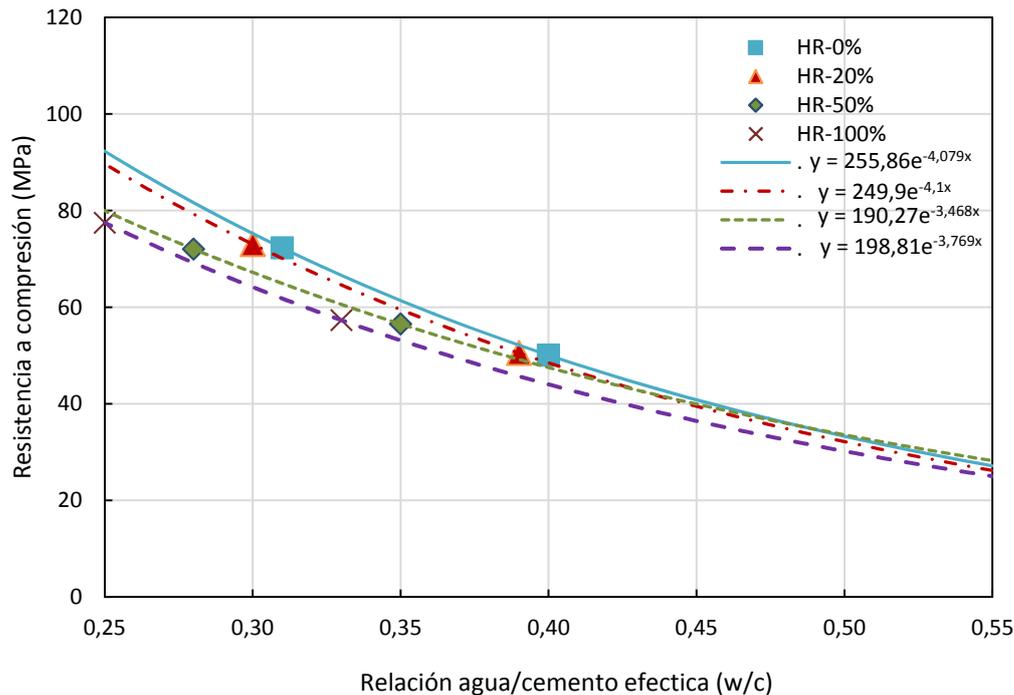


Fig. 116 Resultados de ensayo a compresión para la edad 180 días.

Atendiendo a lo expuesto en el Estado del Arte Apartado 2.4.2.1, página 47, los resultados expuestos en las anteriores gráficas muestran una tendencia que se manifiesta en un aumento de resistencia a medida que la relación w/c disminuye. El aumento de la resistencia en las edades tempranas de los hormigones, con incorporación de porcentajes de árido reciclado del 50% y 100%, es mayor que en el hormigón convencional de control. Se observa un aumento de resistencia con el tiempo, siendo más acentuadas a los 28 días.

Cuando la aportación de árido reciclado es del 20% no producen cambios significativos de resistencia respecto al hormigón de control. Es significativo la disminución de resistencia, a medida que aumenta el grado de sustitución.

Es importante destacar la confluencia de las curvas a medida que aumentamos la relación agua/cemento, confluyendo prácticamente con relaciones w/c de 0,50. Esto puede ser debido a que la menor resistencia del árido reciclado iguala la peor calidad de la pasta para las relaciones agua cemento altas. Inversamente sucede para relaciones agua/cemento bajas, que la diferencia entre el hormigón de control y el hormigón con grados de sustitución es mayor, lo que denota la buena calidad de la pasta nueva.

Para que un hormigón de control tuviera la misma resistencia que un hormigón reciclado con grado de sustitución de 100%, se tendría que disminuir en 0,05 la relación agua/cemento.

Los resultados del ensayo a compresión en la Fase 2, con el AR presaturado, a la edad de 28 y 180 días proporcionaron unos valores de resistencia de 70,5 y 72,3 MPa lo que supone una disminución de un 8 y 6,5% respectivamente.

Los resultados de las resistencias a compresión están en concordancia con los resultados experimentales del estado del arte. De acuerdo con el razonamiento expuesto anteriormente, si se mantiene la dosificación en el hormigón reciclado, la importante absorción del árido reciclado tiene como consecuencia que la relación agua/cemento efectiva (w/c) sea menor, y esto provoca un aumento de resistencia. Al mismo tiempo provoca una disminución de fluidez en el hormigón fresco que se puede compensar en gran medida utilizando o aumentando la proporción de aditivos superplastificantes. Todo ello ha sido experimentado por los autores González Fuenteboa⁴³⁸ e Ikeda⁴³⁹.

4.2.2.2. Resistencia a tracción indirecta

Los resultados correspondientes al estudio experimental se presentan en la Tabla 62 para la edad de 28 y 180 días.

Tabla 62 Resultados del ensayo de tracción indirecta a la edad 28 y 180 días.

TIPO HR Edad	Resistencia a tracción indirecta (MPa)	
	28 Días	Curado Normalizado 180 Días
HR-30-0% (Control)	5,17	5,30
HR-30-20%	5,06	5,09
HR-30-50%	4,85	4,80
HR-30-100%	4,92	4,95
HR-45-0% (Control)	5,30	5,50
HR-45-20%	5,21	5,09
HR-45-50%	4,95	4,85
HR-45-100%	5,00	5,05

⁴³⁸ González Fonteboa, B. (2002). Hormigones con áridos reciclados procedentes de demoliciones: Dosificaciones, propiedades mecánicas y comportamiento estructural a cortante. Tesis. E.T.S.I Caminos Canales y Puertos, A Coruña.

⁴³⁹ Ikeda, T., Yamame, S. and Sakamoto, A. (1988). Strengths of concrete containing Recycled concret aggregate Demolition and Reuse of Concrete Masonry Japan: 858-594.

Es conocido que el comportamiento de la resistencia a tracción indirecta en función de la relación agua/cemento, se ajusta nuevamente a una curva exponencial⁴⁴⁰, cuya formulación es (65):

$$y = Ae^{-B\left(\frac{w}{c}\right)} \quad (65)$$

Donde y es la resistencia a tracción indirecta para la edad considerada, w/c es la relación agua/cemento, A y B son parámetros a calcular.

En las Fig. 117 y Fig. 118 se muestran las curvas resultantes y los parámetros A y B para cada uno de los grados de sustitución.

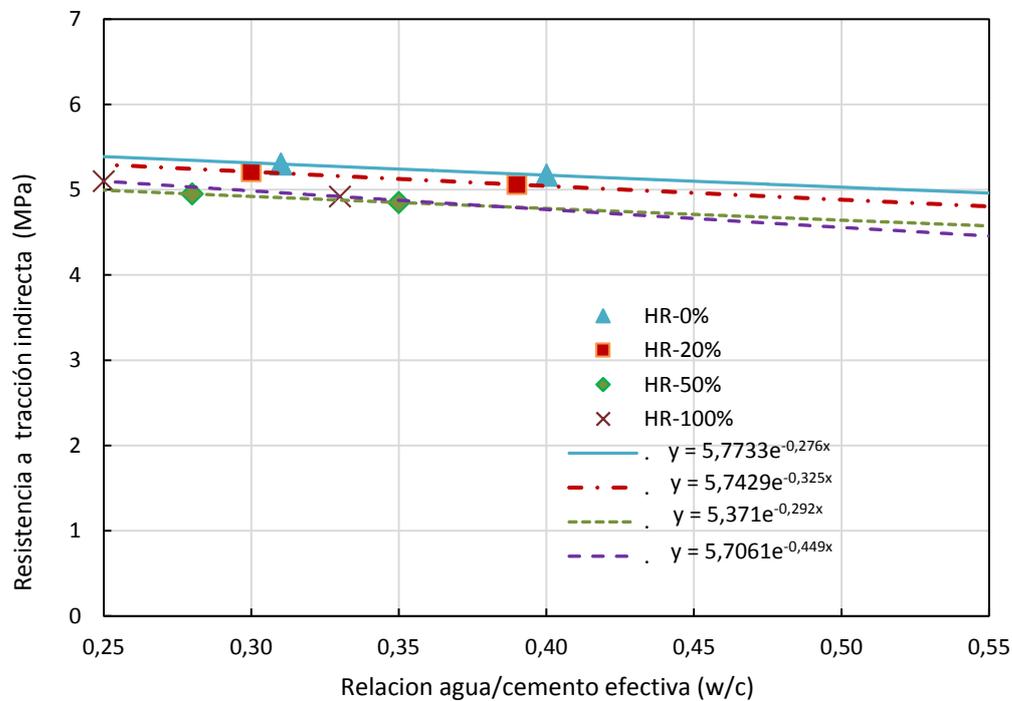


Fig. 117 Resultados de los ensayos de tracción indirecta a 28 días en función de su relación agua/cemento efectiva.

⁴⁴⁰ Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A. and Alaejos, P. (2013). "Durability of recycled aggregate concrete." *Construction and Building Material* **40**: 1054-1065.

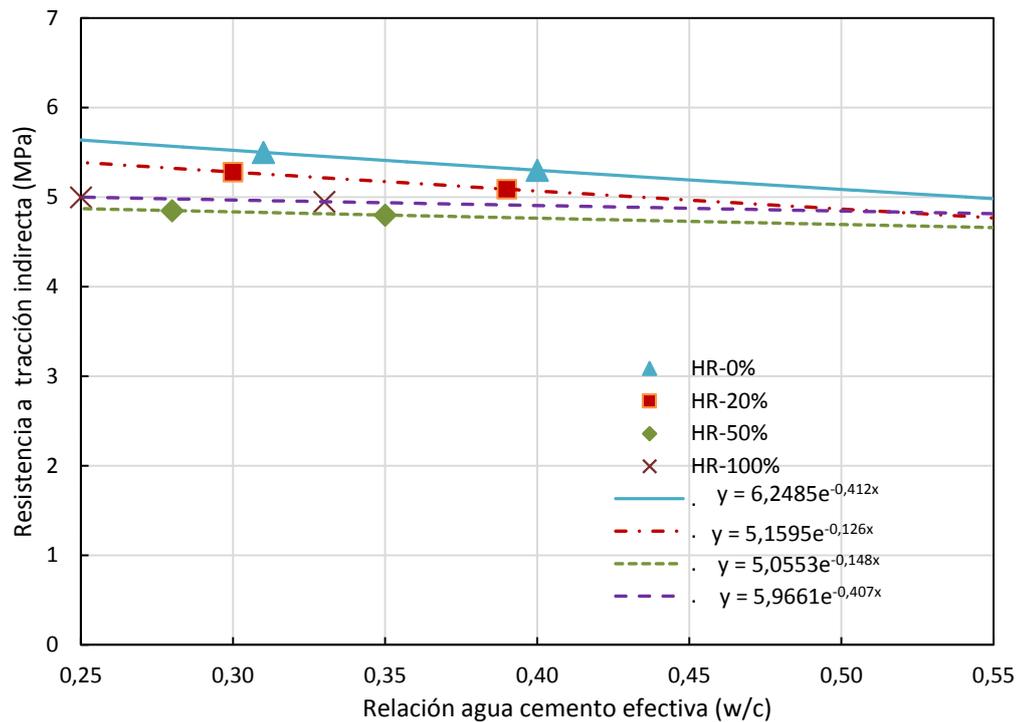


Fig. 118 Resultados del ensayo de tracción indirecta a la edad de 180 días en función de su relación agua/cemento efectiva.

Existe un pequeño aumento de resistencia con la edad, sin ser significativo. La evolución con el tiempo denota un mayor incremento de resistencia en los hormigones con menor relación w/c que en los hormigones con mayor relación w/c.

También se observa que el modelo de curva adoptado, en este caso se ajusta más a una recta de ecuación (66):

$$y = -Ax + B \quad (66)$$

Rectificando al nuevo ajuste, para la edad de 180 días:

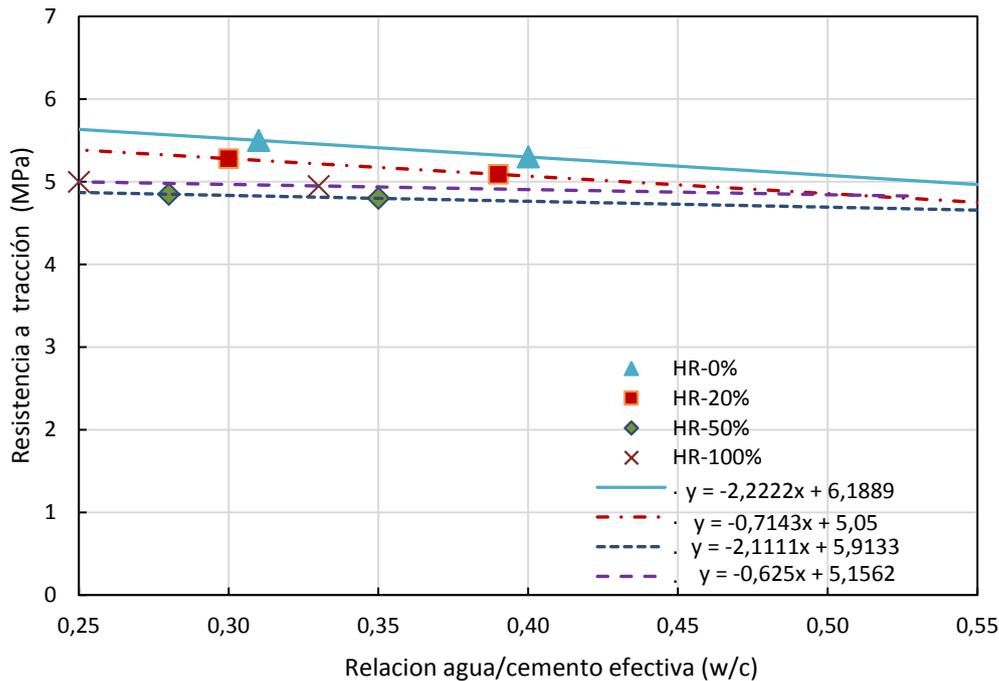


Fig. 119 Resultados de resistencia a tracción directa para la edad de 180 días.

La tendencia de los ajustes efectuados suponen nuevamente aumento de resistencia, con la disminución de la relación agua/cemento efectiva, si bien los valores son decrecientes con el grado de sustitución pero en proporción muy pequeña. La variación entre el hormigón de control y grado de sustitución del 100% supone un 4,8 % para el tipo HR-30 y un 3,7% para el HR-45.

Se observa, de manera mas clara para edad de 180 días, que las curvas confluyen, para relaciones agua/cemento altas, al igual que para la resistencia a compresión, y la diferencia de resistencia es más acusada para el hormigón de control frente a los diferentes grados de sustitución, en relaciones agua/cemento de menor valor.

Los ensayos realizados con áridos presaturados en la Fase 2 para el hormigón catalogados con HR-45-100%-S proporcionan un valor de 5,46 MPa, valor similar al hormigón HR-45-100% dosificado con AR secos, por lo que no se observa influencia sustancial ninguna del árido reciclado en este caso.

4.2.2.3. Resistencia a flexotracción

Los resultados de resistencia a flexotracción se exponen en la Tabla 63.

Tabla 63 Resultados de los ensayos de resistencia a flexotracción.

TIPO HR	Edad	Resistencia a flexotracción (MPa)	
		28 Días	Curado Normalizado 180 Días
HR-30-0% (Control)		6,20	6,50
HR-30-20%		6,30	6,70
HR-30-50%		6,30	6,65
HR-30-100%		5,60	5,90
HR-45-0% (Control)		7,95	8,25
HR-45-20%		7,80	8,35
HR-45-50%		7,80	7,95
HR-45-100%		7,50	7,65

Siguiendo la misma línea de los estudios referenciados en el Capítulo 2, la resistencia a flexotracción, en función de la relación agua/cemento efectiva, se ajusta, de manera semejante al resto de las propiedades mecánicas estudiadas a una, curva exponencial, cuya formulación es (67):

$$y = Ae^{-B \cdot \left(\frac{w}{c}\right)} \quad (67)$$

Donde y es la resistencia a flexotracción obtenida para la edad correspondiente y la w/c es la relación agua/cemento, A y B son parámetros a calcular.

La evolución con el tiempo de la resistencia a flexotracción es similar a la tracción directa, con valores entre el 3% y el 5,50% a los 28 a 180 días respectivamente. La evolución en el tiempo muestra la misma tendencia de incremento a 180 días, tendiendo a igualarse, sobre todo en las proporciones de 50% y 100% de sustitución.

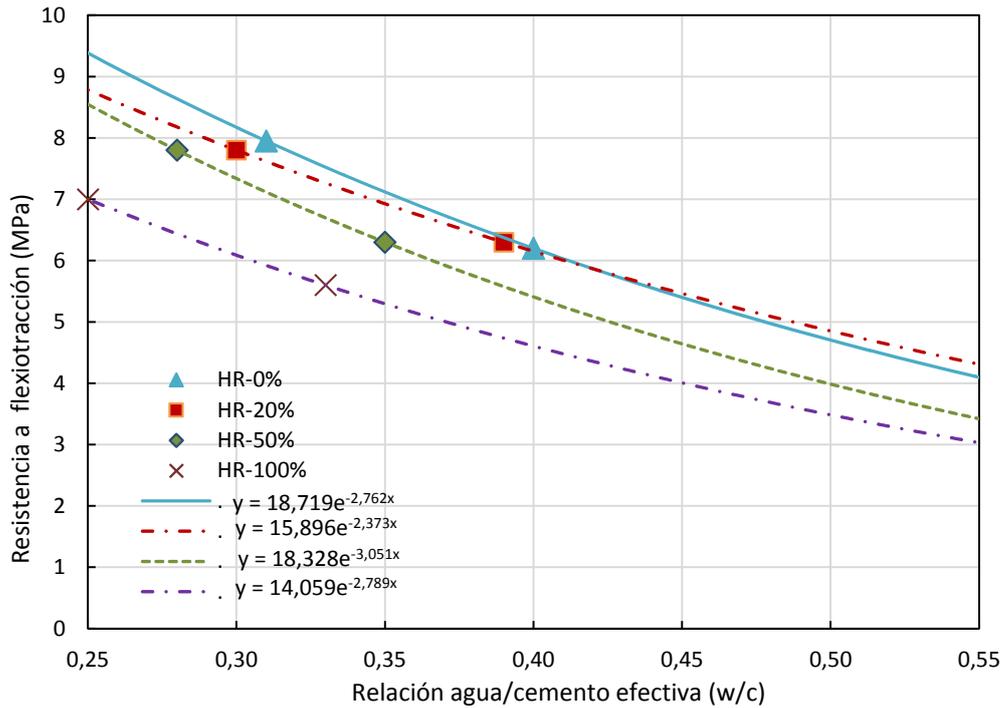


Fig. 120 Resultados del ensayo de flexiotracción de los hormigones catalogados como HR-30 y HR-45 a la edad de 28 días.

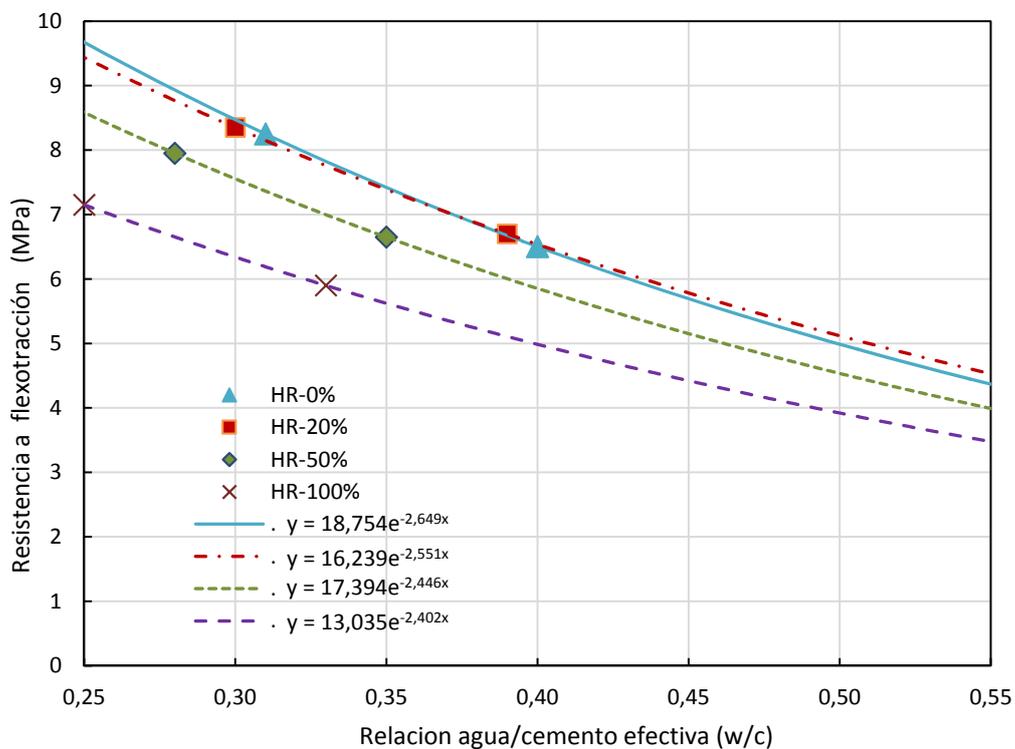


Fig. 121 Resultados del ensayo de flexotracción de los hormigones catalogados como HR-30 y HR-45, edad 180 días.

Los resultados para la sustitución del 20% presentan escasa variación; incluso observándose que la línea de tendencia se invierte para valores de w/c mayores de 0,4. Se observa también una disminución de resistencia a medida que aumenta la relación agua/cemento que además disminuye con el grado de sustitución. Para sustituciones de un 100% las pérdidas de resistencia varían del 3% a 4% y son significativamente menores que los valores del estado del arte que oscilan entre un $\pm 20\%$ según los estudios de Alaejos⁴⁴¹.

Al igual que en la resistencia a compresión y tracción se confirma la tendencia de las curvas de ajuste a confluir para relaciones agua/cemento bajas, igualándose las resistencias cuando la resistencia del árido reciclado tiende a igualarse con la nueva pasta de peor calidad.

Para alcanzar la misma resistencia entre el hormigón de control y el hormigón con sustitución del 100%, deberíamos reducir la relación agua/cemento en 0,12.

Para los hormigones dosificados con AR presaturados (Fase 2), la disminución de la resistencia es de un 1,3%, acorde con su mayor relación agua/cemento efectiva, si bien con poca diferencia respecto al hormigón fabricado con áridos secos.

4.2.2.4. Módulo de elasticidad estático

Los resultados de módulo de elasticidad estático a la edad de 28 días se especifican en Tabla 64.

Tabla 64 Valores de módulo de elasticidad estático.

Módulo de elasticidad estático (GPa)		Curado normalizado
TIPO HR	Edad	28 días
HR-30-0%	(Control)	36,98
HR-30-20%		38,50
HR-30-50%		35,15
HR-30-100%		34,03
HR-45-0%	(Control)	40,83
HR-45-20%		42,60
HR-45-50%		38,01
HR-45-100%		37,80

⁴⁴¹ Sánchez, M. and Alaejos, P. (2012). Estudio sobre las propiedades del hormigón fabricado con áridos reciclados. Monografías CEDEX. M. d. Fomento. Madrid. Monografías: 220.

El ajuste determinado por estudios similares⁴⁴² queda definido por una recta de ecuación (68):

$$y = -Ax + B \quad (68)$$

Los resultados de módulo de elasticidad y y los parámetros A y B obtenidos se especifican en la Fig. 122, en función de su relación agua/cemento efectiva.

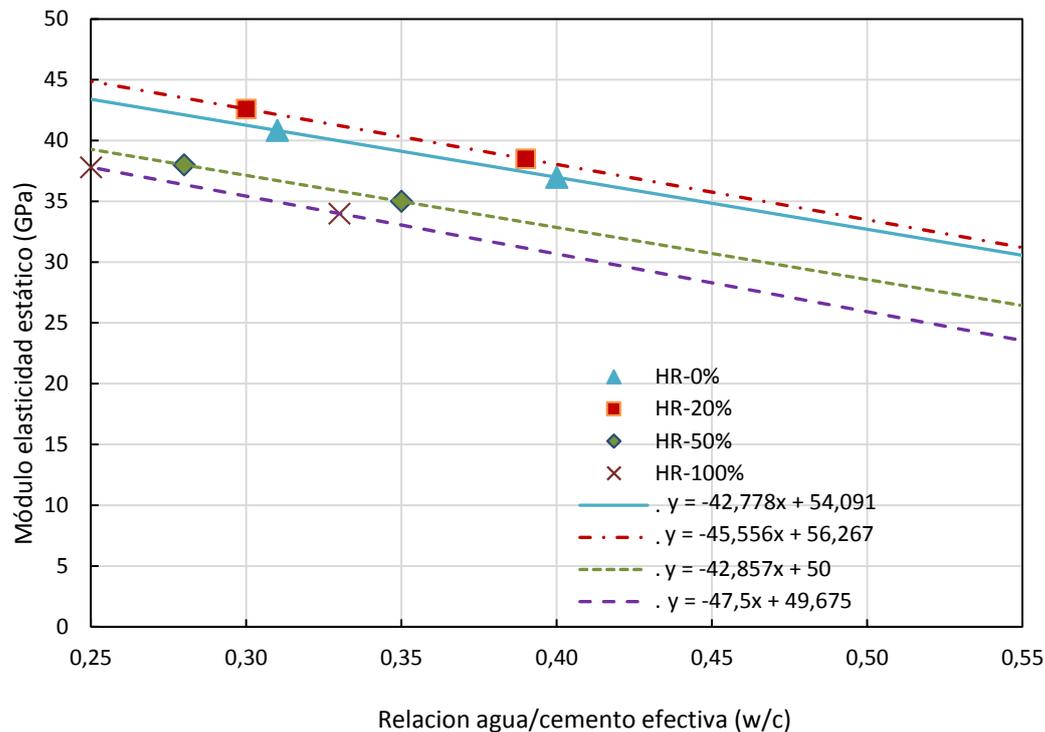


Fig. 122 Resultados del ensayo módulo elasticidad estático en función de la relación agua/cemento efectiva.

Como era de esperar el módulo de elasticidad disminuye con el grado de sustitución, en consonancia con el menor módulo de elasticidad del árido reciclado respecto al árido natural, debido a la mayor porosidad y al mayor volumen de pasta de cemento adherido, correspondiente a todo hormigón autocompactable.

Pueden observarse comportamientos prácticamente paralelos para los distintos grados de sustitución. Los ajustes de los hormigones de referencia y con sustitución del 20% son muy similares coincidiendo para relaciones w/c más altas.

⁴⁴² Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A. and Alaejos, P. (2013). "Durability of recycled aggregate concrete." *Construction and Building Material* **40**: 1054-1065.

Mantener el módulo de elasticidad de un hormigón con un 50% de árido reciclado, en comparación con su hormigón de referencia, supondría reducir su relación agua/cemento en un 0,10, y para una incorporación de un 100% en un 0,15.

La variación entre el hormigón de referencia y reciclado para las dos dosificaciones resultan ser de un 7% a 8% inferiores que otros estudios similares, con áridos procedentes de prefabricación⁴⁴³.

A continuación, se analiza a partir de la formulación existente expuesta en el capítulo 3 Metodología, la estimación del módulo de deformación. La mayor parte de estas formulaciones relaciona la resistencia a compresión y el módulo, sin embargo, el ACI 318:83⁴⁴⁴ y varios estudios introducen en la formulación el valor de la densidad y permiten una mayor aproximación a los resultados obtenidos en la experimentación del presente trabajo. La Fig. 123 recoge una comparativa entre los resultados obtenidos en la formulación expuesta en la metodología Apartado 3.4.2.6, página153.

Las formulaciones que relacionan la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad pueden resultar orientativas. La formulación sugerida por Kakizaki¹⁴⁷ proporciona valores acordes con el programa experimental.

⁴⁴³ Soares, D., Brito, J., Ferreira, J. and Pacheco, J. (2014). "Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance." *Ibid.* **71**: 263-272.

⁴⁴⁴ ACI-318-SR-05 (2002). Structural Concrete. A. c. Institute. Michigan.

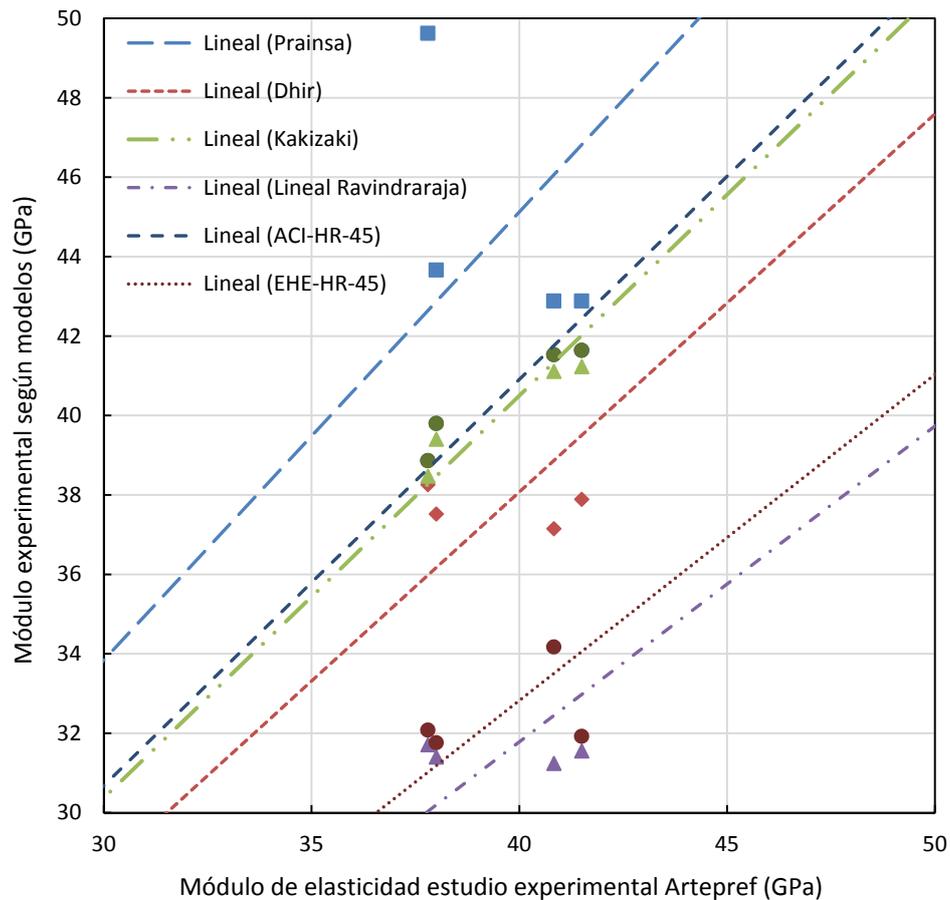


Fig. 123 Comparativo de los distintos modelos encontrados en la bibliografía: Ravindraraja⁴⁴⁵; Dhir⁴⁴⁶; Kakizaki⁴⁴⁷; Prainsa⁴⁴⁸; Código ACI⁴⁴⁹

Las curvas de tendencia de Dhir y Kakizaki presentan una buena adaptación, con la particularidad de que la fórmula de Dhir depende de los valores de la resistencia a compresión y como se expuso en el capítulo correspondiente dicha resistencia se incrementa a medida que aumenta el porcentaje de sustitución, por lo tanto la curva de tendencia también expresa incremento. Sin embargo la expresión de Kakizaki que incluye la densidad (ds) responde de forma óptima a los resultados de los ensayos realizados.

⁴⁴⁵ Ravindrarajha, R. and Tam, c. (1987). "Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate." *Magacin of Concrete Research* **37**(130): 29-38.

⁴⁴⁶ Dhir, R. K. and Limbchiya (1999). "Suitable of recycled concrete aggregate for use BS 5328 Designated Mixes." *Structures and Building*.

⁴⁴⁷ Kakizaki, M., Harada, M., Soshiroda, T., Kubota, S., Ikeda, T. and Kasai, Y. (1988). Strength and elastic Modulus of Recycled Aggregate Concrete and Masonry. *Demolition And Reuse of demolition Waste.RILEM Symposium on demolition and Reuse of concrete Masonry. JAPAN. 2*: 623-632.

⁴⁴⁸ Pérez Benedicto, J. A. (2011). Estudio experimental sobre propiedades mecánicas del hormigón reciclado con áridos procedentes de la no calidad. Departamento de construcciones Madrid, Universidad Politécnica de Madrid.

⁴⁴⁹ ACI-318-SR-05 (2002). *Structural Concrete*. A. c. Institute. Michigan.

4.2.2.5. Módulo de elasticidad dinámico

La Tabla 65 recoge los resultados del módulo elástico dinámico, calculados a partir de los ensayos realizados de ultrasonidos, densidad y resistencia a compresión aplicando las fórmulas expuestas en la metodología.

Tabla 65 Módulo de elasticidad dinámico.

	Tiempo	ρ (Densidad)	Módulo de Elasticidad dinámico
TIPO HR	μS (*)	g/cm^3	(GPa)
HR-30-0% (Control)	61,4	2,420	52,87
HR-30-20%	61,1	2,430	52,72
HR-30-50%	63,5	2,397	48,15
HR-30-100%	64,6	2,309	45,10
HR-45-0% (Control)	60,8	2,417	54,01
HR-45-20%	61,1	2,396	53,04
HR-45-50%	62,1	2,383	51,07
HR-45-100%	62,9	2,342	48,92

(*) Longitud probeta 300 mm.

Para poder comparar el módulo de elasticidad dinámico en los distintos hormigones en función de su relación agua/cemento efectiva, se presupone un ajuste mediante la ecuación constituida por una recta decreciente de fórmula (69):

$$y = -Ax + B \quad (69)$$

En la Fig. 124 se muestra los valores A y B representados en las ecuaciones de ajuste correspondientes, y en función de la relación agua/cemento efectiva.

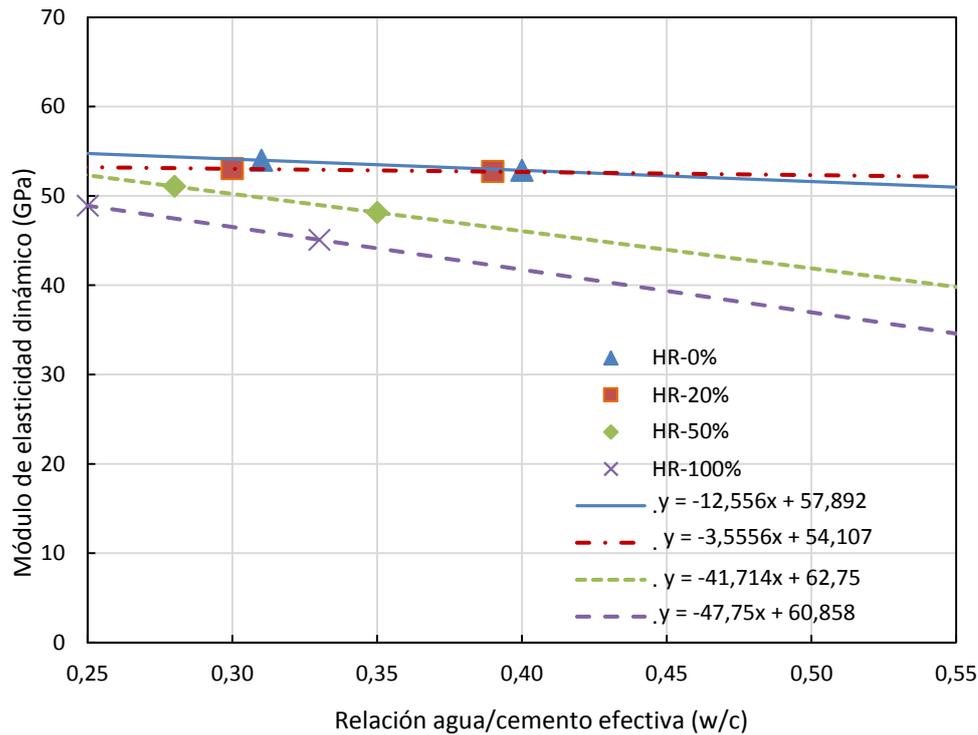


Fig. 124 Resultados valores de módulo de elasticidad dinámico en función de la relación agua/cemento efectiva.

Se observa al igual que en el módulo de elasticidad estático una disminución del módulo de elasticidad dinámico a medida que aumenta la relación agua/cemento, en mayor medida para las sustituciones de 50% y 100%. El hormigón de control y el hormigón con grado de sustitución de un 20% apenas sufren variación.

La relación entre el módulo de elasticidad estático y dinámico tiene una variación comprendida entre 0,7-0,8.

En los trabajos de Alaejos⁴⁵⁰ se estudia la influencia entre los modelos estáticos y dinámicos en función del porcentaje de sustitución y de la resistencia.

En la Fig. 125 se aprecia un incremento de resistencia a medida que aumenta la relación, E_c estático/ E_c dinámico para porcentajes de sustitución del 0% al 20%. Cuando el grado de sustitución aumenta al 50% y 100% dicho efecto desaparece.

⁴⁵⁰ Sánchez, M. and Alaejos, P. (2012). Estudio sobre las propiedades del hormigón fabricado con áridos reciclados. Monografías CEDEX. M. d. Fomento. Madrid. **Monografías**: 220.

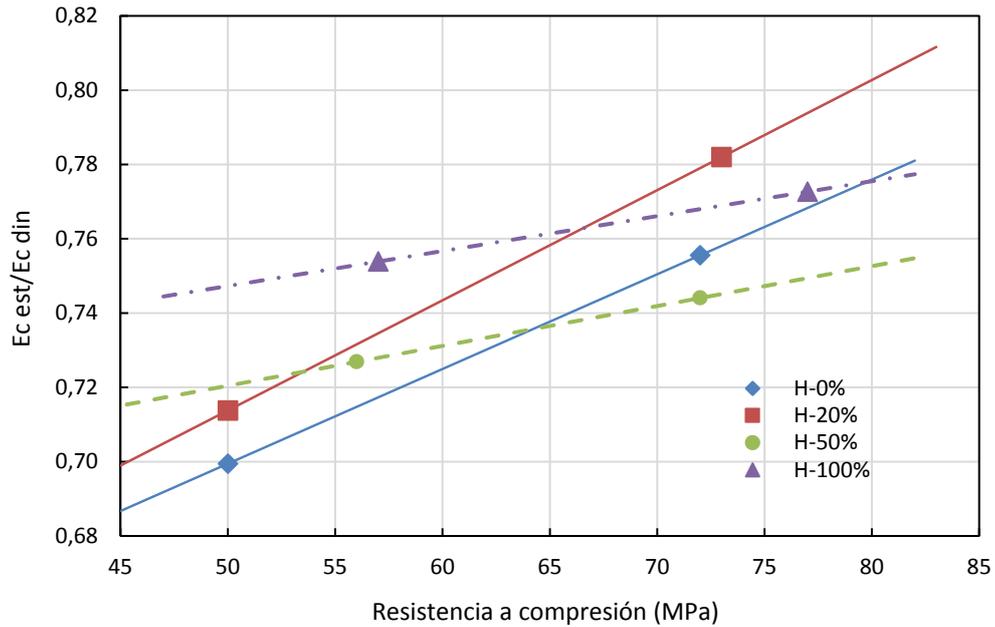


Fig. 125 Relación entre el módulo de elasticidad estático/dinámico con la resistencia a compresión.

Este efecto singular sobre el módulo de la elasticidad dinámica, que se produce para grados de sustitución altos 50% y 100%, denota la mayor tendencia a la plasticidad que poseen los hormigones con áridos reciclados, tal y como se demuestra en los ensayos experimentales referenciados anteriormente.

4.2.3. Propiedades físicas y mecanismos de transporte. Aspectos influyentes en la durabilidad

4.2.3.1. Coeficiente de absorción

Se evaluó la absorción del HR-30 y HR-45 con 0%, 20%, 50% y 100% de sustitución para las edades de 28 y 180 días. Los resultados se presentan en la Tabla 66.

Tabla 66 Valores de absorción a la edad de 28 y 180 días.

Ensayo de absorción (% peso)		Curado condiciones normalizadas	
TIPO HR	Edad	28 Días	180 Días
HR-30-0%	(Control)	3,30	3,05
HR-30-20%		3,40	3,17
HR-30-50%		3,80	3,73
HR-30-100%		4,10	4,20
HR-45-0%	(Control)	2,95	2,35

Ensayo de absorción (% peso)		Curado condiciones normalizadas	
TIPO HR	Edad	28 Días	180 Días
HR-45-20%		3,00	2,37
HR-45-50%		3,20	2,40
HR-45-100%		3,01	2,30

En las Fig. 126 y Fig. 127 se presentan los resultados obtenidos para la absorción de los hormigones en función de su relación agua/cemento efectiva. Los ajustes de los valores obtenidos se asimilan a una curva logarítmica, como así se demuestra en estudios relativos a la durabilidad⁴⁵¹. La ecuación de ajuste de esta curva es:

$$y = A \ln(x) + B \quad (70)$$

Los valores A y B obtenidos se muestran en las Fig. 126 y Fig. 127 correspondientes a las edades de 28 y 180 días.

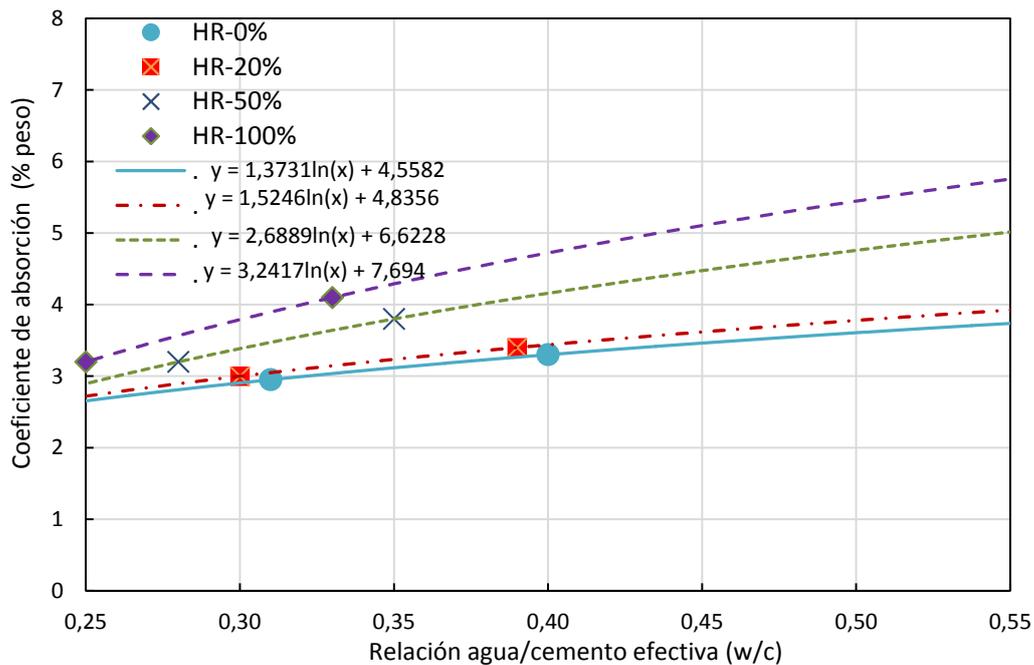


Fig. 126 Valores de absorción para los hormigones HR-45 y HR-30 para las edades 28 días.

⁴⁵¹ Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A. and Alaejos, P. (2013). "Durability of recycled aggregate concrete." *Construction and Building Material* **40**: 1054-1065.

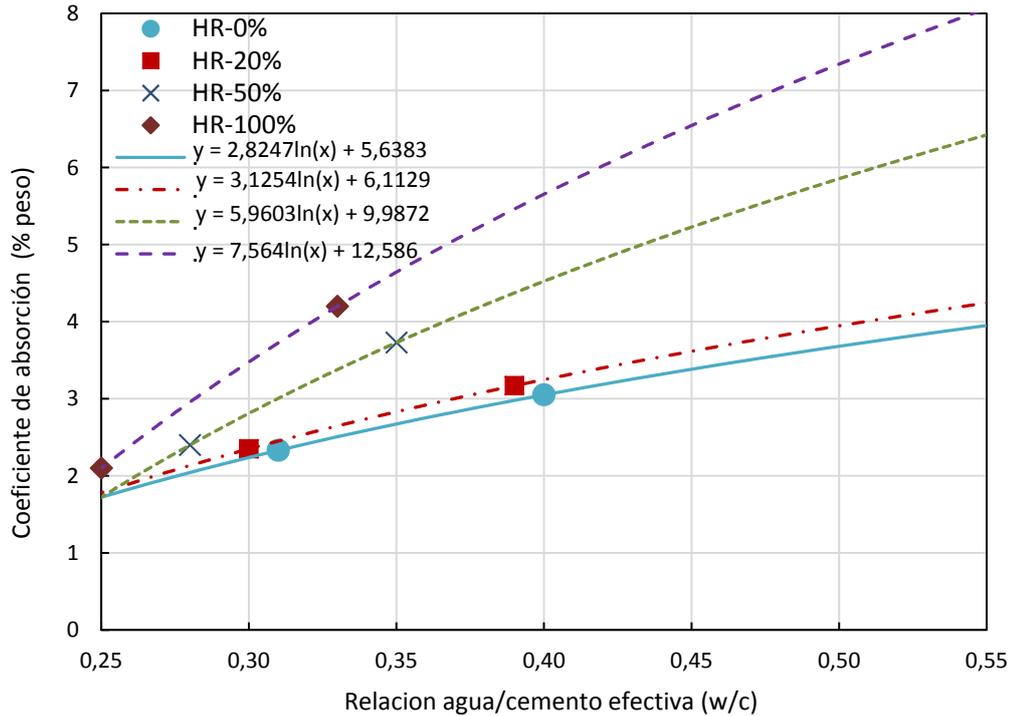


Fig. 127 Valores de absorción para los hormigones HR-45 y HR-30 para las edades 180 días.

La evolución de la tendencia la absorción con la edad es a igualarse, tal y como se aprecian en los gráficos anteriores. Además, se observa, que los valores de absorción se ven reducidos a la edad de 180 días.

El hormigón es más absorbente cuanto mayor es la relación agua/cemento y el grado de sustitución. Del análisis de estos resultados:

- 1) El hormigón reciclado es más absorbente que el hormigón de control, y es más más absorbente cuanto más árido reciclado se incorpore.
- 2) La influencia del AR en el coeficiente de absorción no es la misma para todas las relaciones agua/cemento. A medida que aumenta la w/c la influencia del AR sobre el coeficiente de absorción es mayor y cuando la relación w/c es baja, las diferencias se reducen. Este efecto puede ser debido a que las pastas menos absorbentes, las de menor w/c, aíslan la porosidad y amortiguan el efecto que tiene el AR sobre la absorción.

El hormigón es tanto más absorbente cuanto mayor es la relación agua/cemento y el grado de sustitución. Por ejemplo para un hormigón con relación agua/cemento 0,45 el valor de la absorción es de 3,4 a 4,9 significando un aumento de un 30%, para una sustitución de un 100% de árido reciclado.

La confluencia de las curvas hacia valores menores de relación agua/cemento, concluye que la nueva pasta tiene un efecto de recubrimiento de barrera sobre el árido reciclado, lo que supone que dichos valores tiendan a igualarse. Inversamente la pasta de menor calidad en relaciones agua/cemento altas revela mayores diferencia con el árido reciclado.

La absorción es mayor en los hormigones de menor resistencia HR-30, frente a HR-45. Esto es debido a la evolución de los poros producida por la recristalización de los componentes del cemento que producen un efecto favorable colmatando gran parte de ellos^{452 453}.

En referencia a la relación entre absorción y compresión (Fig. 128) la misma revela la existencia de una relación tipo exponencial decreciente⁴⁵⁴ de la resistencia a medida que aumenta el coeficiente de absorción.

Para valores de absorción inferiores al 2,5%, se comprueba que la presencia de árido reciclado no influye en la resistencia a compresión. En estas condiciones, puede deducirse que, independientemente del árido reciclado empleado, la resistencia se sitúa por encima de los 80 MPa.

⁴⁵² Andrea, V. (2012). Durabilidad en hormigones armados con árido reciclado. Una evaluación de la corrosión en ambiente marino. Tesis. Valencia, Universida Politecnica Valencia: 359.

⁴⁵³ Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A. and Alaejos, P. (2013). "Durability of recycled aggregate concrete." *Construcción and Building Material* **40**: 1054-1065.

⁴⁵⁴ Thomas, C. (2010). Hormigón reciclado de aplicación estructural: Durabilidad en ambiente marino y comportamiento a fatiga. Ciencia e ingeniería del terreno y los materiales. Santander, Cantabria: 356.

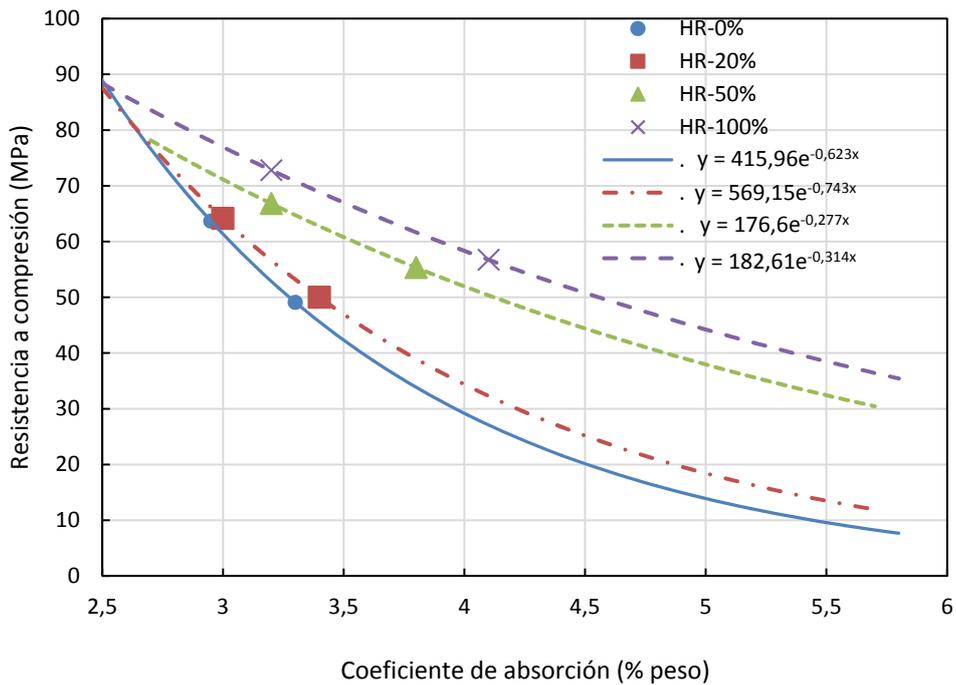


Fig. 128 Relación entre la resistencia a compresión con el coeficiente de absorción.

4.2.3.2. Porosidad accesible

La utilización para la fabricación de hormigón estructural del árido grueso reciclado, con niveles de sustitución altos está condicionada por elevada absorción.

Los valores resultantes de porosidad se especifican en la Tabla 67 .

Tabla 67 Resultados ensayo de porosidad.

Ensayo de porosidad (% en volumen)		Curado condiciones normalizadas	
TIPO HR	Edad	28 Días	180 Días
HR-30-0% (Control)		7,30	7,25
HR-30-20%		7,50	7,40
HR-30-50%		8,15	7,85
HR-30-100%		8,50	8,10
HR-45-0% (Control)		5,15	4,40
HR-45-20%		5,80	4,60
HR-45-50%		6,00	5,85
HR-45-100%		6,30	6,00

Los valores de porosidad obtenidos se sitúan por debajo de 15%, valor considerado como límite por el CEB-1998⁴⁵⁵, para un hormigón de calidad buena.

Al igual que en la absorción y según los estudios de referenciados, las curvas de ajuste son del tipo logarítmico⁴⁵⁶ según la fórmula (71) y cuyos valores A y B se calculan a partir de los resultados obtenidos:

$$y = A \ln(x) + B \quad (71)$$

En la Fig. 129 y Fig. 130 se muestran las gráficas de porosidad en función de la relación agua/cemento y los resultados de los coeficientes A y B para cada grado de sustitución.

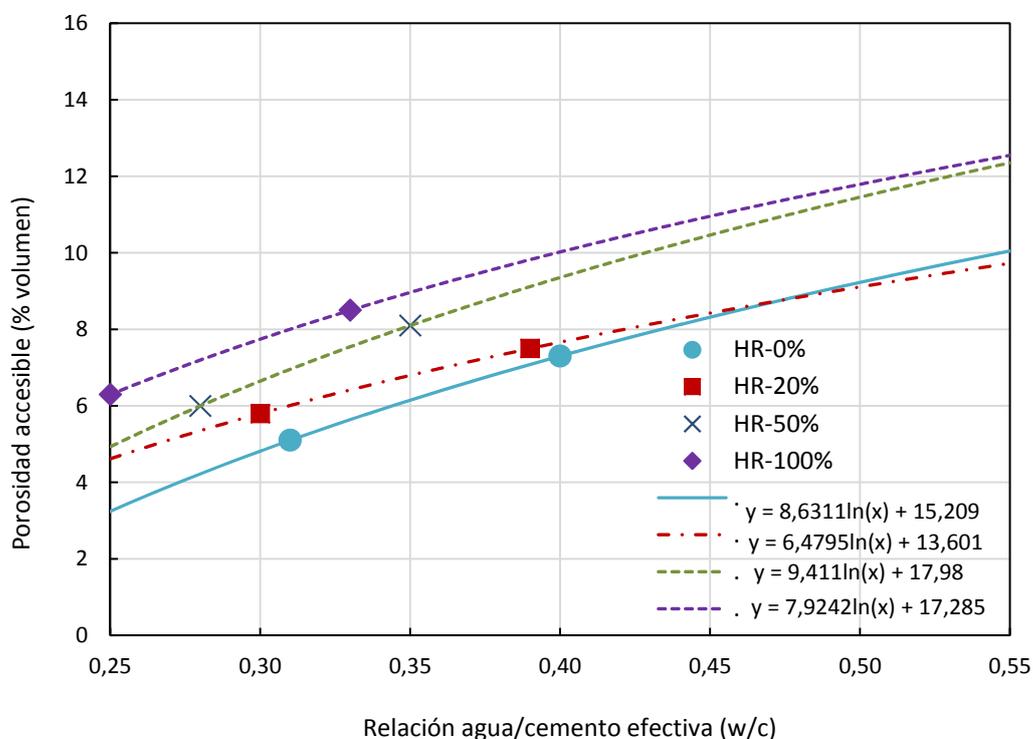


Fig. 129 Resultados de porosidad en función de su relación agua/cemento efectiva a la edad de 28 días.

⁴⁵⁵ CEB (1998). Comité Euro-International du Béton. Strategies for testing and Assessments of concrete structures affected by reinforcement corrosion. C. E.-I. d. Béton. Laussane (Suiza), Bulletin 243.

⁴⁵⁶ Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A. and Alaejos, P. (2013). "Durability of recycled aggregate concrete." Construction and Building Material **40**: 1054-1065.

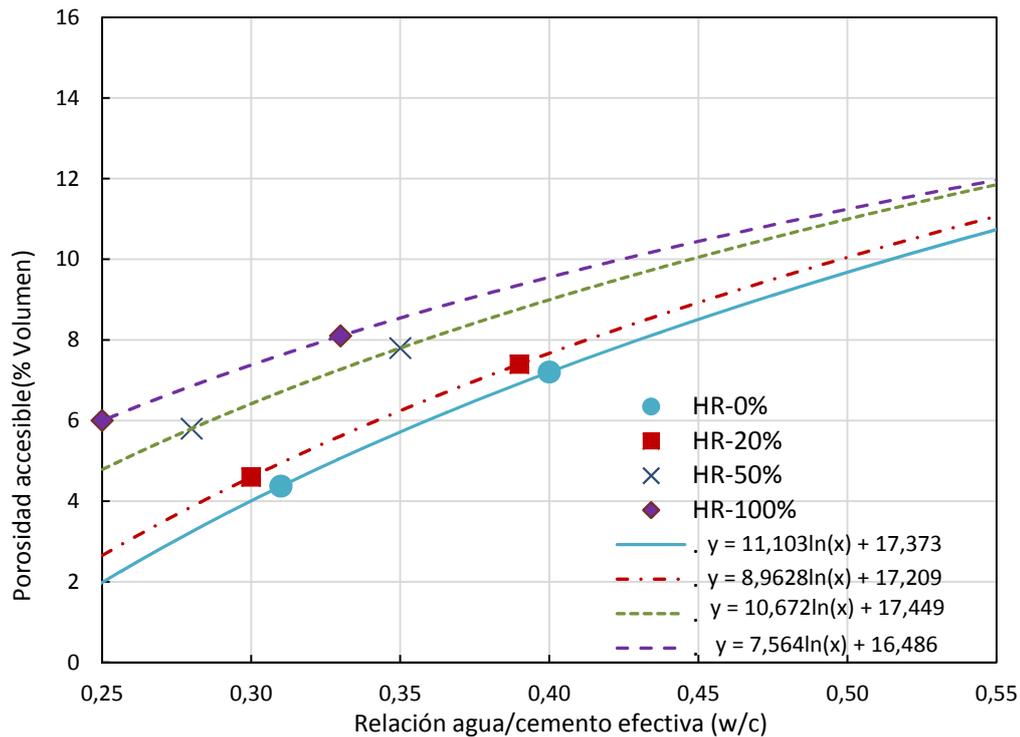


Fig. 130 Resultados de los valores de porosidad en función de su relación agua/cemento efectiva a la edad de 180 días.

La evolución con el tiempo muestra una disminución de los valores de porosidad de los 28 a 180 días.

De los resultados obtenidos, se deriva que la incorporación de árido reciclado implica aumento de porosidad accesible del hormigón. Las curvas son crecientes a medida que aumenta la relación agua/cemento. El aumento de porosidad de los hormigones con grado de sustitución alto, respecto al hormigón de control, alcanza valores entre 18 y 25%.

Si bien a diferencia de la absorción, la porosidad accesible no puede estar aislada por la pasta, por lo que afecta en mayor medida a los hormigones con pastas menos porosas.

La confluencia de las curvas hacia valores de relación agua/cemento alta, se justifica, en que la porosidad del árido reciclado no predomina frente a la pasta de menor calidad. Para relaciones agua/cemento menores la diferencia entre la porosidad del hormigón de control y los hormigones con grado de sustitución son mayores, siendo el árido reciclado más influyente.

A partir de los resultados obtenidos podemos concluir que, la incorporación de árido reciclado implica un aumento de la porosidad accesible en el hormigón. En

particular para una relación agua/cemento de 0,50 y una sustitución de un 50% de árido reciclado disminuye esta relación en 0,05. De la misma manera para una sustitución de un 100%, debería rebajar la relación agua/cemento aproximadamente en un 0,1.

4.2.3.3. Succión por capilaridad

Se presentan los resultados de succión por capilaridad en Fig. 131, Fig. 132, Fig. 133, Fig. 134, a la edad de 28 y 180 días. La curva de ajuste de los valores de succión se ajusta a una curva logarítmica, resultando valores de correlación entre 0,92-0,98.

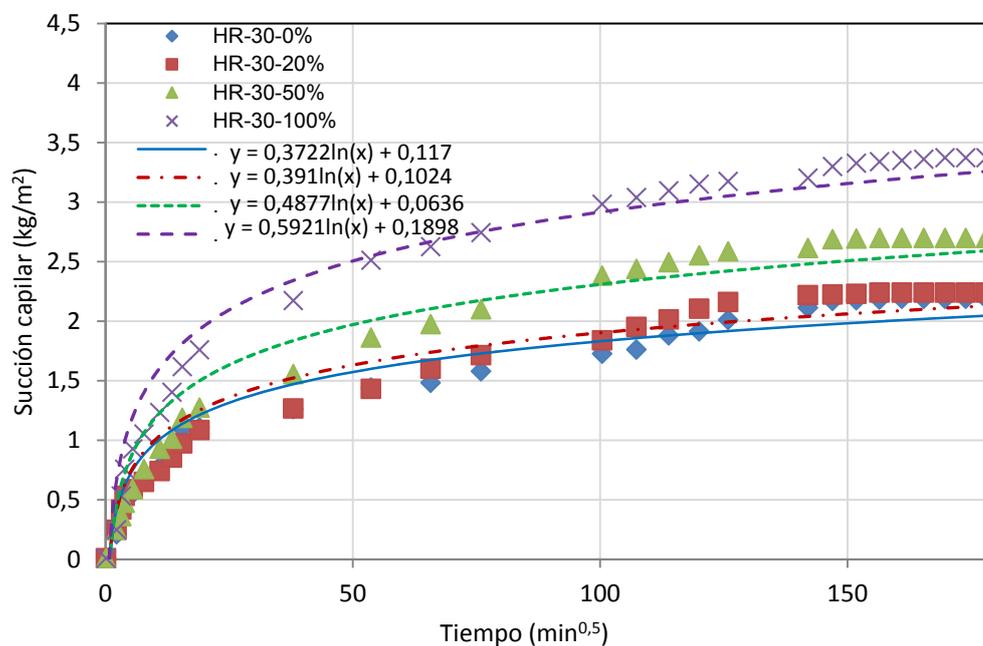


Fig. 131 Resultados de succión capilar del hormigón HR-30 con la edad de 28 días.

La evolución con el tiempo supone, al igual que la absorción y porosidad, una disminución de los valores del coeficiente de succión capilar.

Los valores de succión capilar para la sustitución de 0%, 20% y 50% aumentan de manera poco significativa para los casos analizados, entre un 2% y 5%. Sin embargo, para la sustitución del 100% la variación respecto al hormigón de control aumenta hasta valores de un 18 %.

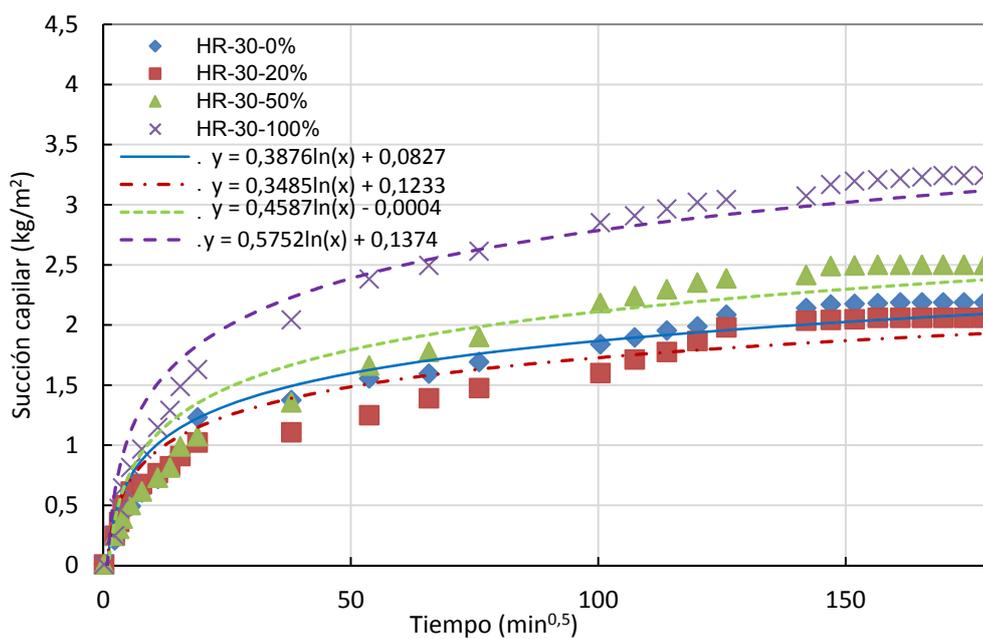


Fig. 132 Resultados de succión por capilaridad HR-30 a la edad de 180 días.

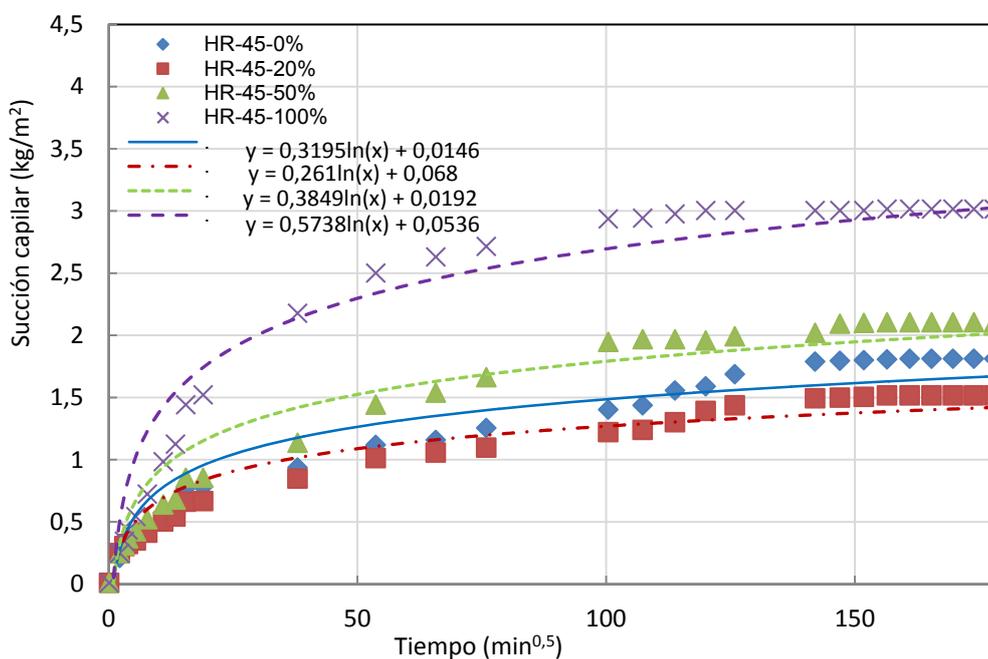


Fig. 133 Resultados ensayo succión por capilaridad del hormigón HR-45 a la edad de 28 días.

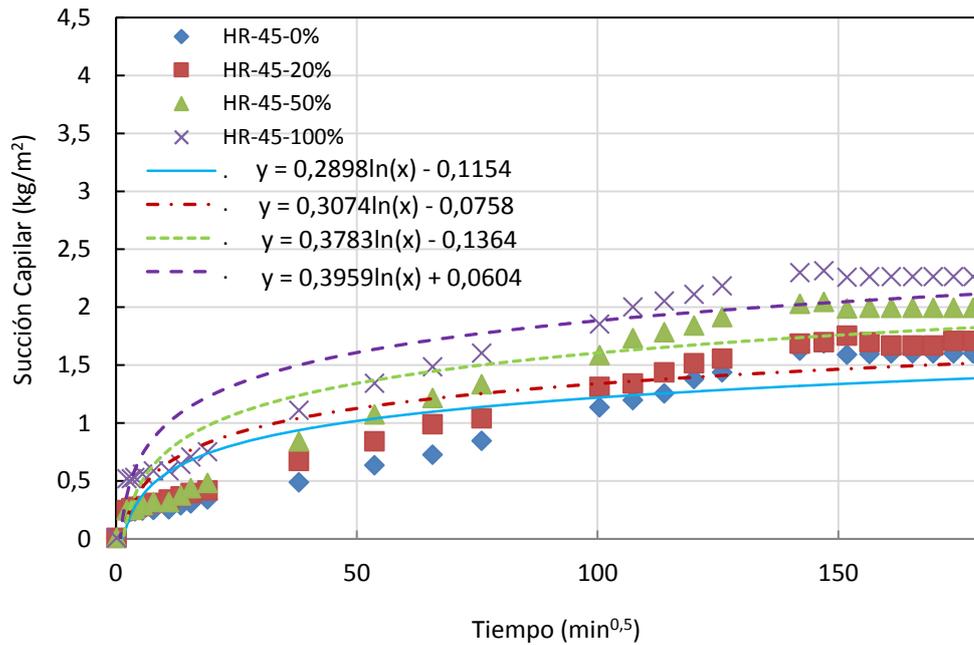


Fig. 134 Resultados del ensayo de succión por capilaridad para el HR-45 a los 180 días.

La Fig. 135 representan la tendencia del ensayo de capilaridad para las 24 h, en función de su relación agua/cemento efectiva, ajustándose a una función logarítmica de ecuación (72):

$$y = A \ln(x) + B \quad (72)$$

La evolución de la succión a las 24 horas relaciona la absorción de los poros de pequeño tamaño. La succión por capilaridad aumenta con el grado de sustitución y con una mayor relación agua/cemento efectiva. También las diferencias entre el hormigón de control y con grados de sustitución, son mayores para relaciones agua/cemento bajas.

La Fig. 136 representa la tendencia de la succión por capilaridad para las probetas ensayadas a los 28 días de curado normalizado.

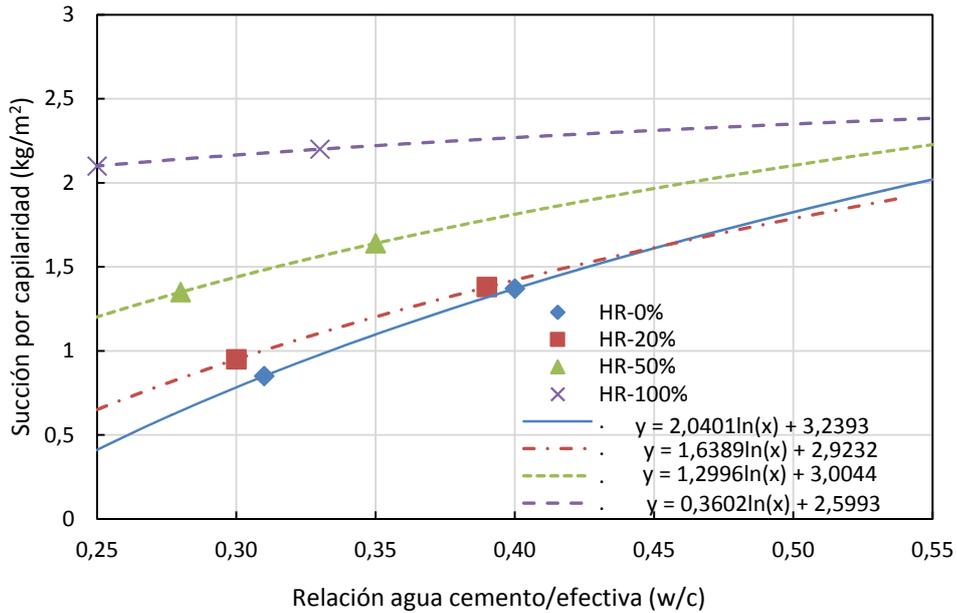


Fig. 135 Gráfica de resultados de succión por capilaridad a las 24 horas.

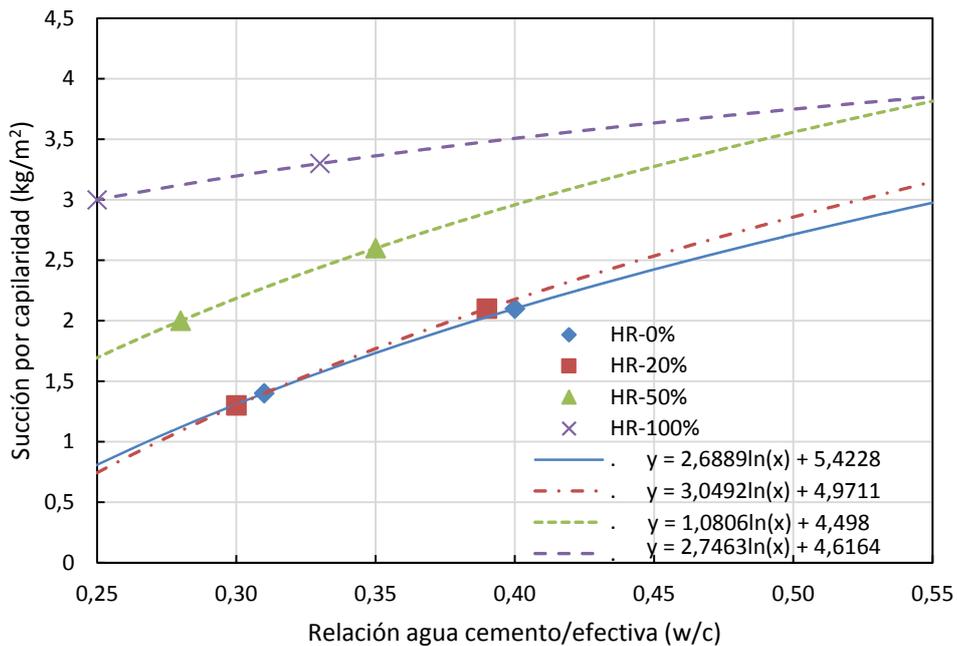


Fig. 136 Gráfica de resultados de succión por capilaridad máximos de probetas curadas 28 días.

La experimentación demuestra que cuando disminuye la relación agua/cemento efectiva, la influencia del árido es mucho mayor reduciendo este efecto al aumentar la relación agua/cemento por lo que la pasta nueva tiene más influencia. Inversamente para relaciones agua/cemento altas las curvas tienden a confluir ya que el árido reciclado y la pasta se igualan.

En la Fase 2, con áridos reciclados presaturados y sustitución del 100%, los valores obtenidos son de 3,25 kg/m² lo que supone un aumento respecto a la dosificación con áridos secos de un 1,28%, resultado acorde debido a la mayor relación agua/cemento efectiva en la fase de presaturación de los áridos.

También hay que destacar que el empleo de superplastificantes (SP) reduce notablemente la absorción capilar, tal y como demuestra D. Soares⁴⁵⁷ con una reducción de un 52% entre la dosificación sin SP y con SP, como consecuencia también de reducir su relación w/c, resultados análogos en otros estudios.

4.2.3.4. Penetración de agua bajo presión

En la Fig. 137 se muestran los resultados una vez realizado el ensayo de tracción directa.

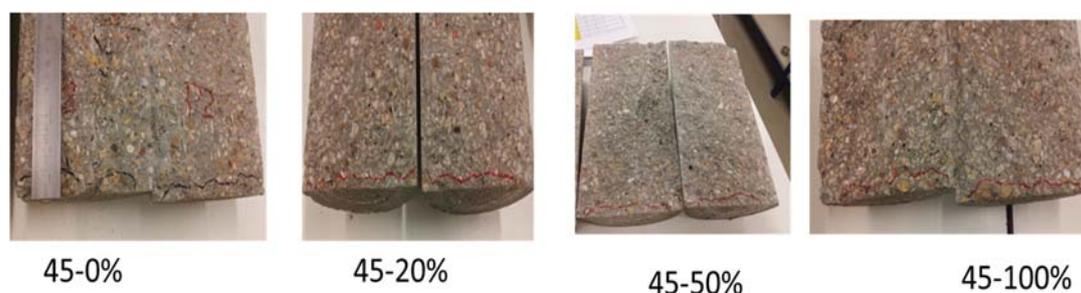


Fig. 137 Resultados de penetración máxima para hormigones HR-45 ($w/c=0,35$) y sustituciones de 0-20%-50%-100%.

En la Tabla 68 se muestran los valores de los resultados de penetración de agua bajo presión obtenidos.

Tabla 68 Penetración agua bajo presión

Edad TIPO HR	Penetración agua bajo presión (mm)			
	28 días		Curado normalizado 180 días	
	Máximo	Medio	Máximo	Medio
HR-30-0% (Control)	21	10,0	20	12,0
HR-30-20%	16	12,8	15	12,0
HR-30-50%	27	13,5	23	14,0
HR-30-100%	24	11,5	22	13,6
HR-45-0% (Control)	17	12,0	17	12,2
HR-45-20%	17	8,6	16	8,2

⁴⁵⁷ Soares, D., Brito, J., Ferreira, J. and Pacheco, J. (2014). "Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance." *Ibid.* 71: 263-272.

Edad	Curado normalizado			
	28 días		180 días	
	Máximo	Medio	Máximo	Medio
HR-45-50%	19	15,0	20	14,6
HR-45-100%	18	14,5	17	14,4

La representación de los ajustes de las curvas obtenidas, a partir de los resultados anteriores en función de la relación agua/cemento efectiva, se expresan a través de una curva logarítmica según estudios consultados⁴⁵⁸, de ecuación (73):

$$y = A \ln(x) + B \tag{73}$$

Donde los parámetros A y B se calculan en función de los valores x e y siendo la relación agua/cemento efectiva y los valores de penetración de agua bajo presión Fig. 138 y Fig. 139.

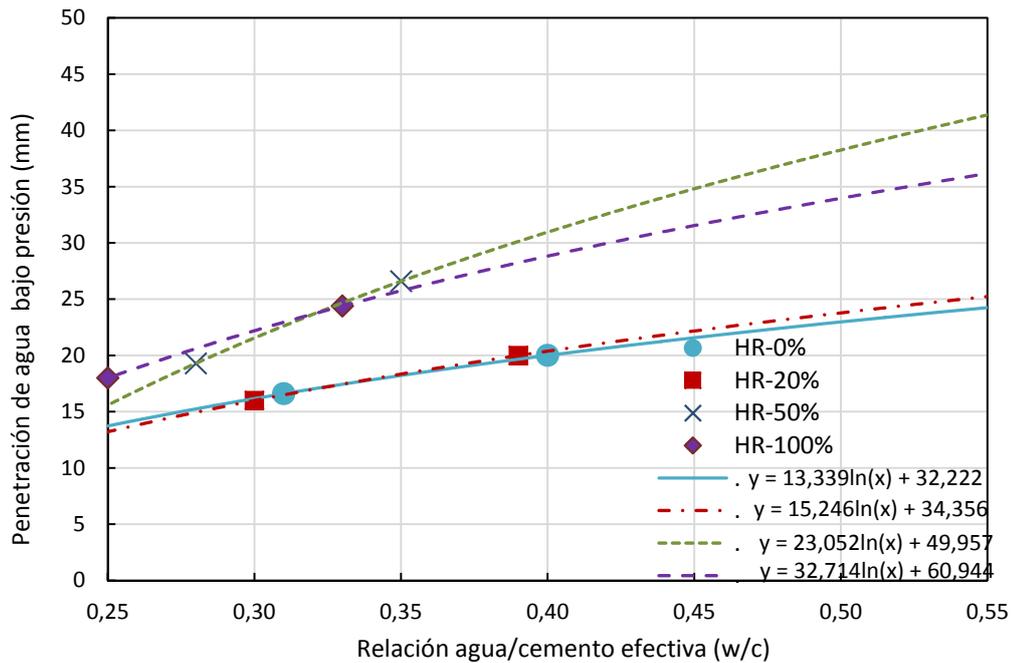


Fig. 138 Resultados ensayo de penetración bajo presión para los hormigones HR-30 y HR-45 a la edad de 28 días en función a su relación agua/cemento efectiva.

⁴⁵⁸ Thomas, C. (2010). Hormigón reciclado de aplicación estructural: Durabilidad en ambiente marino y comportamiento a fatiga. Tesis. Departamento de Ciencia e Ingeniería de Terreno y de los Materiales. Santander, Universidad de Cantabria: 458.

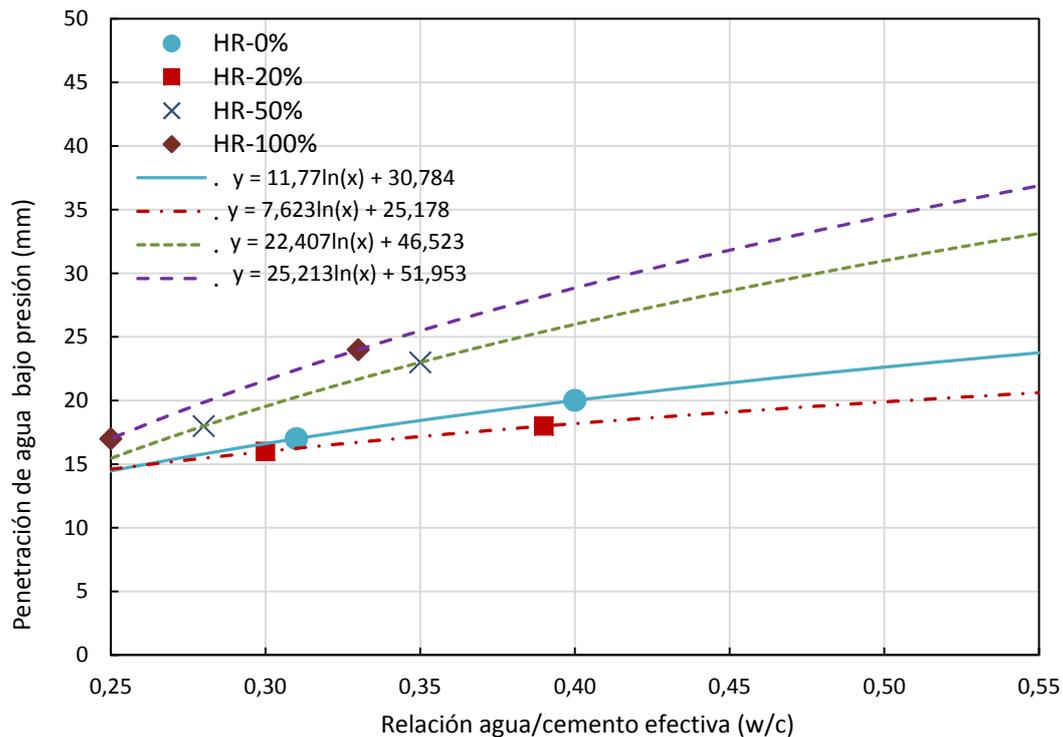


Fig. 139 Resultados ensayo de penetración bajo presión para los hormigones HR-30 y HR-45 a la edad de 180 días en función a su relación agua/cemento efectiva.

La evolución de los ensayos de 28 a 180 días, revela una disminución de los valores obtenidos, siguiendo la misma tendencia que en los ensayos de absorción, porosidad y succión capilar.

La tendencia de mayor valor de penetración máxima, a medida que aumentamos el porcentaje de sustitución, se produce también en el hormigón de mayor relación agua/cemento. Las curvas de hormigones de control con grado de sustitución de 20%, son prácticamente similares o coincidentes.

Se observa, para todas las edades analizadas, las curvas tienden a confluir en valores de penetración de agua de entre 15 a 20 mm, siendo la relación agua/cemento efectiva entre 0,25 a 0,30. Bajo estas condiciones puede confirmarse que las diferencias registradas entre hormigones de control y reciclados son mínimas.

Para obtener un valor de penetración máxima de hormigón con un 100% de sustitución igual al hormigón de control, se debe reducir la relación agua/cemento en 0,07.

La comprobación experimental ensayada permite obtener un hormigón suficientemente impermeable para el ambiente en el que va estar ubicado. Esta comprobación deberá realizarse cuando el hormigón este expuesto ambiente III o IV,

o cuando el ambiente presente cualquier clase específica de exposición, en la siguiente gráfica se especifica los límites de profundidad media (30 y 20 mm), siendo también todos favorables para la profundidad máxima (30 y 50 mm) tal y como se mostró en las gráficas anteriores.

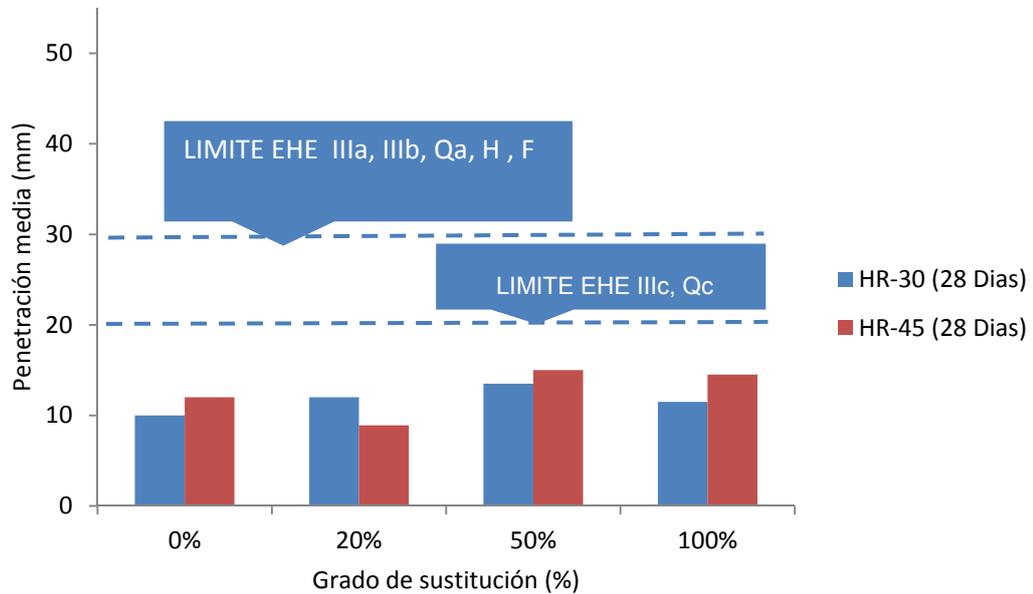


Fig. 140 Resultados y límites EHE según ambiente para la profundidad media. (III Clase exposición marino, H y F: con heladas, Q: clase específica químico agresivo)

La excelente calidad del hormigón reciclado supone la aplicación del mismo en elementos prefabricados, en los ambientes de exposición más exigentes.

Al aumentar la resistencia del hormigón la permeabilidad disminuye. En general la permeabilidad de los hormigones con áridos reciclados presenta un comportamiento similar a la de los hormigones convencionales tal y como postulan algunos autores⁴⁵⁹.

En Fig. 141 se expone la relación entre la penetración de agua bajo presión y la resistencia a compresión cuyo ajuste óptimo se representa por una función exponencial.

Se comprueba que para valores de penetración de agua de 10-15 mm la resistencia que han de verificar el hormigón reciclado es de 60-80 MPa.

⁴⁵⁹ Limbachiya, M. C., Leelawat, T. and Dhir, R. K. (2000). "Use of Recycled concrete Aggregates in High-strength concrete " *Materials and Structures* **33**: 574-580.

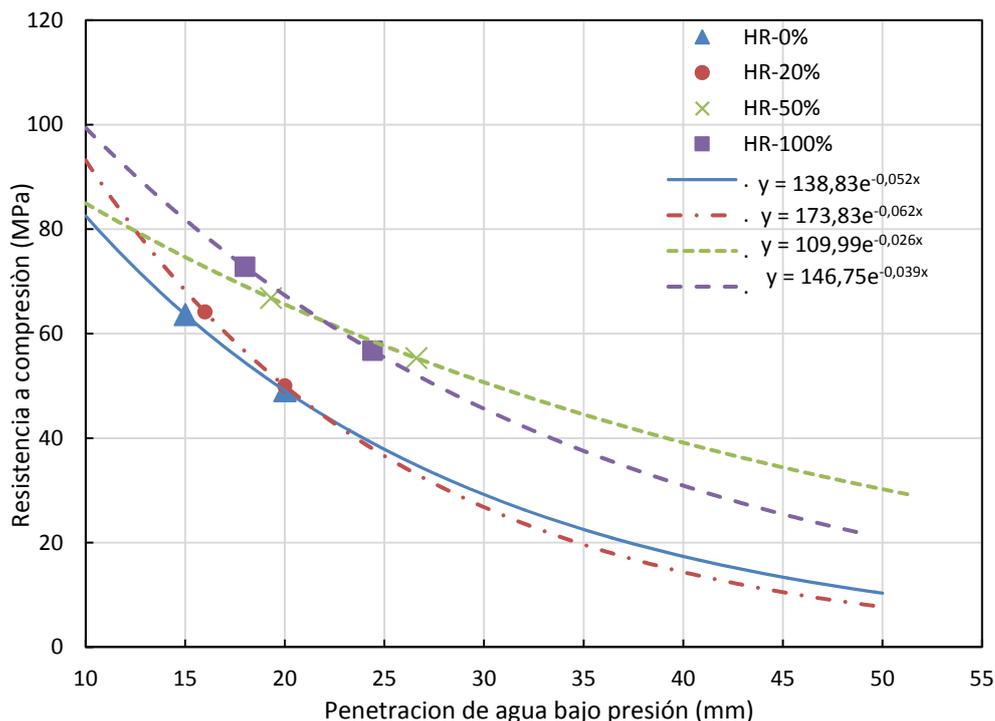


Fig. 141 Relación entre penetración de agua bajo presión y resistencia a compresión.

4.2.3.5. Densidad

Los resultados de las densidades relativas, (Fig. 142) densidad aparente (Fig. 143) y densidad saturada (Fig. 144) se exponen en para cada tipo de hormigón según las dosificaciones que componen el programa experimental y en función de su relación agua/cemento efectiva.

Para la densidad relativa, aparente y saturada de los hormigones de control y reciclados con 28 días de edad curados en ambiente normalizado, se observa una clara tendencia de ésta a aumentar de forma lineal con la disminución de la relación agua/cemento, según la ecuación (75), y en consonancia con otros estudios^{460 461}:

$$y = A - Bx \quad (74)$$

Siendo A y B los ajustes según el grado de sustitución y relación agua/cemento efectiva que se expresan en la figuras antes referenciadas.

Así mismo todos los grados de sustitución evolucionan de manera paralela al disminuir tal relación.

⁴⁶⁰ Thomas, C. (2010). Hormigón reciclado de aplicación estructural: Durabilidad en ambiente marino y comportamiento a fatiga. Ciencia e ingeniería del terreno y los materiales. Santander, Cantabria: 356.

⁴⁶¹ Sánchez, M. and Alaejos, P. (2012). Estudio sobre las propiedades del hormigón fabricado con áridos reciclados. Monografías CEDEX. M. d. Fomento. Madrid. **Monografías:** 220.

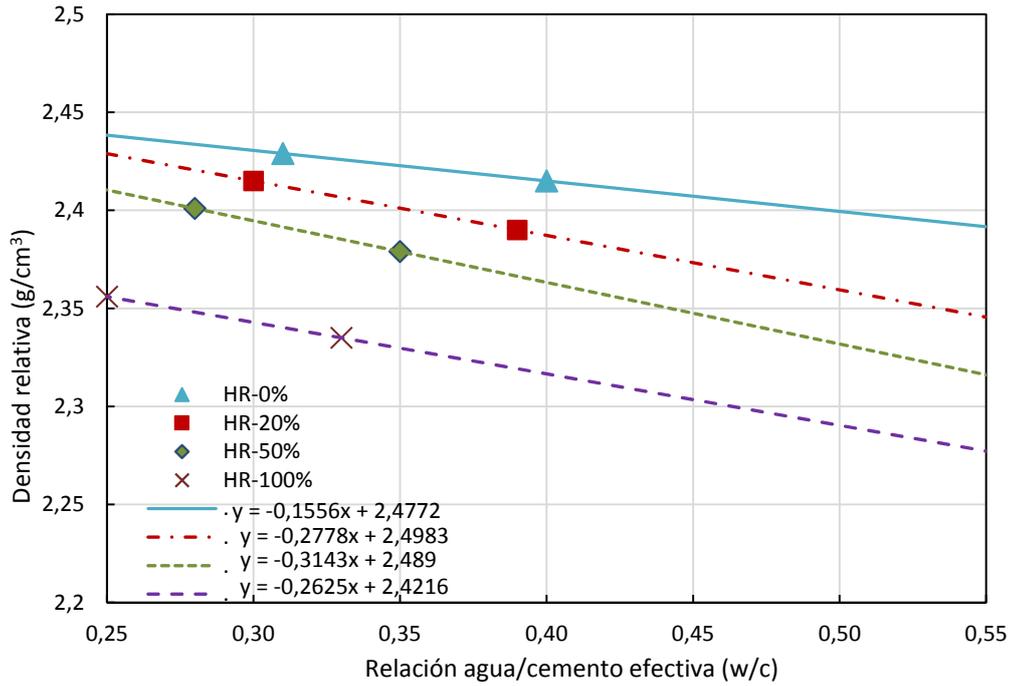


Fig. 142 Gráfico de resultados de densidad relativa en función de las relaciones agua/cemento efectiva para la edad de 28 días.

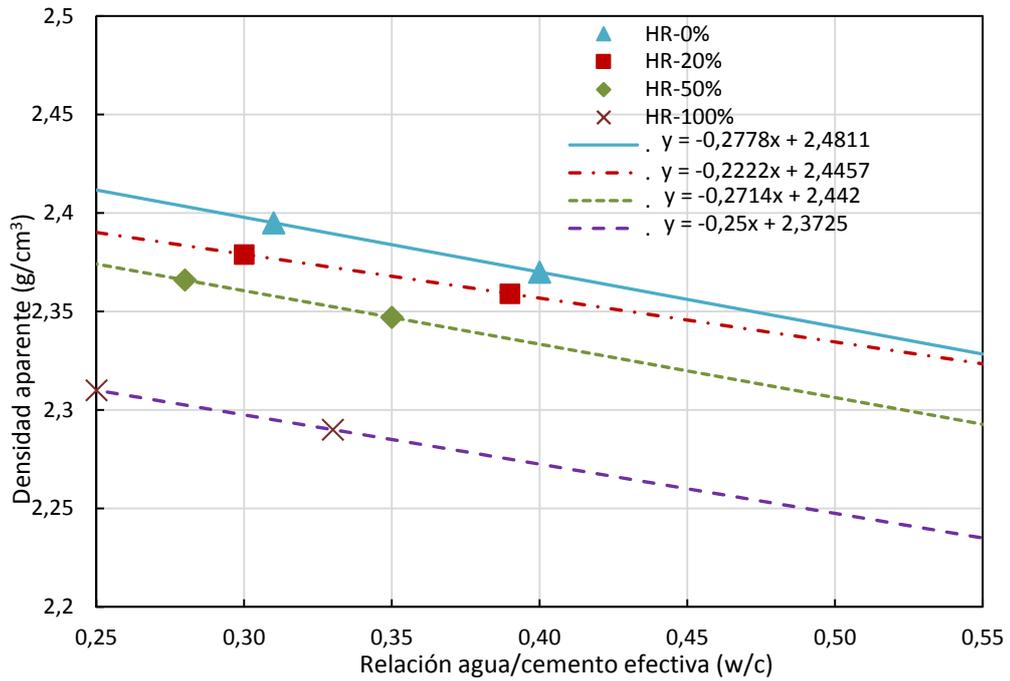


Fig. 143 Gráfico de resultados de densidad aparente en función de la relación agua/cemento efectiva para la edad de 28 días.

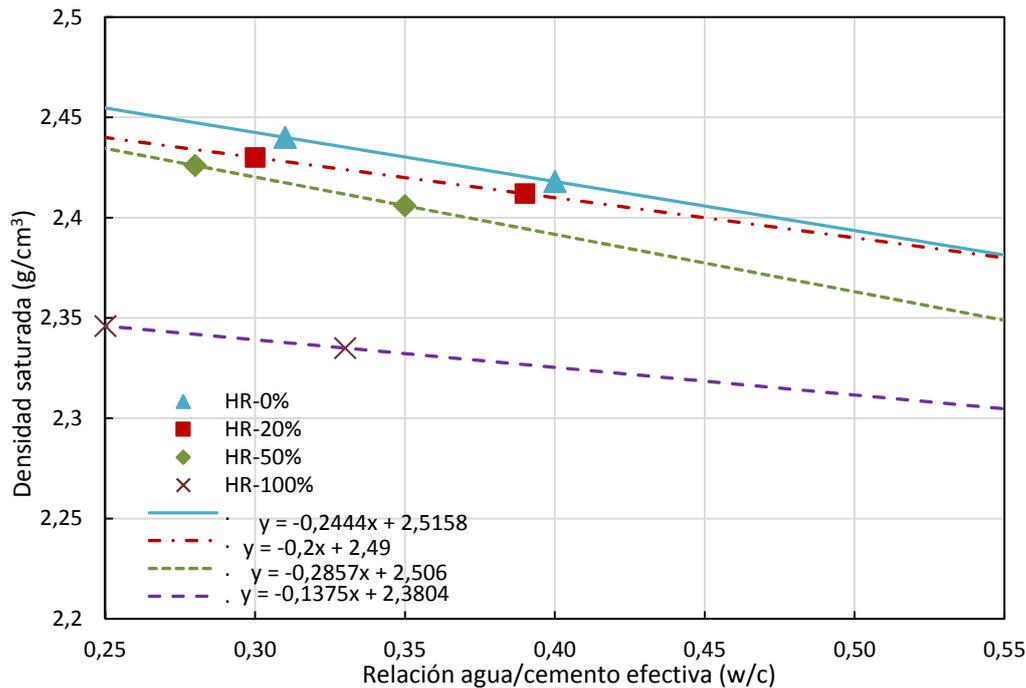


Fig. 144 Gráfico resultados de densidad saturada en función de la relación agua/cemento efectiva para la edad de 28 días.

Los resultados obtenidos de densidad se encuentran entre 2,290 y 2,410 g/cm³ para el hormigón de control y de 2,220 a 2,350 g/cm³ para el hormigón reciclado.

Las gráficas de las densidades disminuyen todas ellas de manera paralela, la densidad relativa, densidad aparente y densidad saturada, a medida que aumenta el valor de la relación agua cemento y a medida que aumenta el grado de sustitución.

Si relacionamos la densidad con el coeficiente de absorción obtenemos un ajuste óptimo exponencial Fig. 145 como se ha encontrado en autores de referencia⁴⁶². Se observa que las curvas con sustituciones 50% y 100% tienden a confluir para densidades de 2,28 g/cm³ y la absorción por encima del 9%. En este punto la densidad del hormigón se aproxima a la densidad del árido reciclado y en estas condiciones el efecto de la absorción pasa a predominar por la capacidad absorbente de la pasta de cemento, dejando de ser influyente la absorción del propio árido reciclado.

⁴⁶² Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A. and Alaejos, P. (2013). "Durability of recycled aggregate concrete." *Construction and Building Material* **40**: 1054-1065.

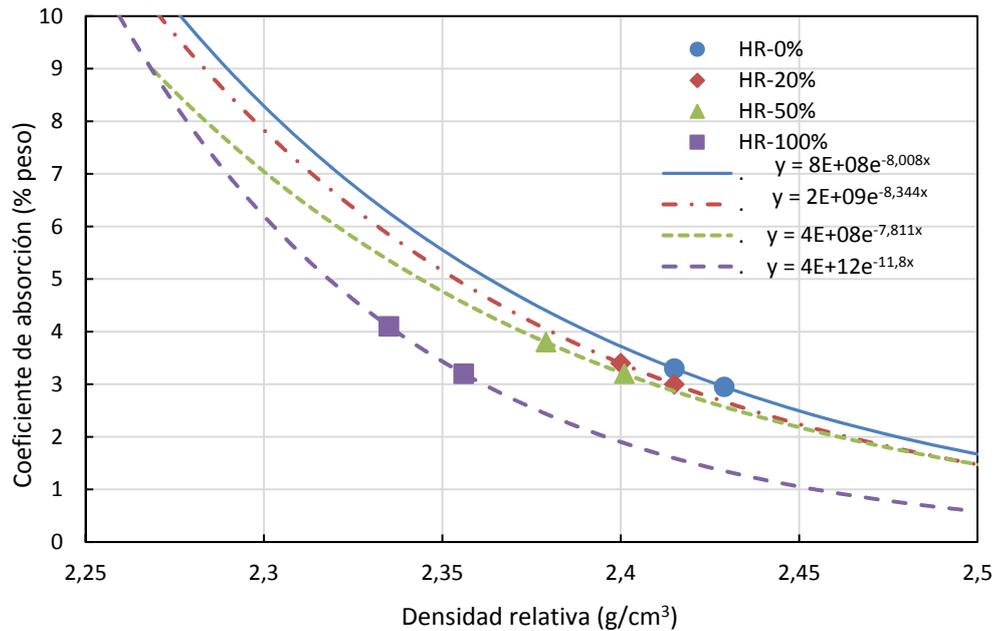


Fig. 145 Relación entre densidad relativa y coeficiente de absorción.

4.2.3.6. Velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos

Es conocido que la relación entre la velocidad de las ondas ultrasónicas ⁴⁶³ y la relación agua/cemento efectiva se puede expresar mediante la ecuación (74):

$$y = -Ax + B \quad (75)$$

Donde los valores A y B junto a los resultados obtenidos de relación agua/cemento efectiva e impulsos ultrasónicos se representan en la Fig. 146

⁴⁶³ Thomas, C. (2010). Hormigón reciclado de aplicación estructural: Durabilidad en ambiente marino y comportamiento a fatiga. Tesis. Departamento de Ciencia e Ingeniería de Terreno y de los Materiales. Santander, Universidad de Cantabria: 458.

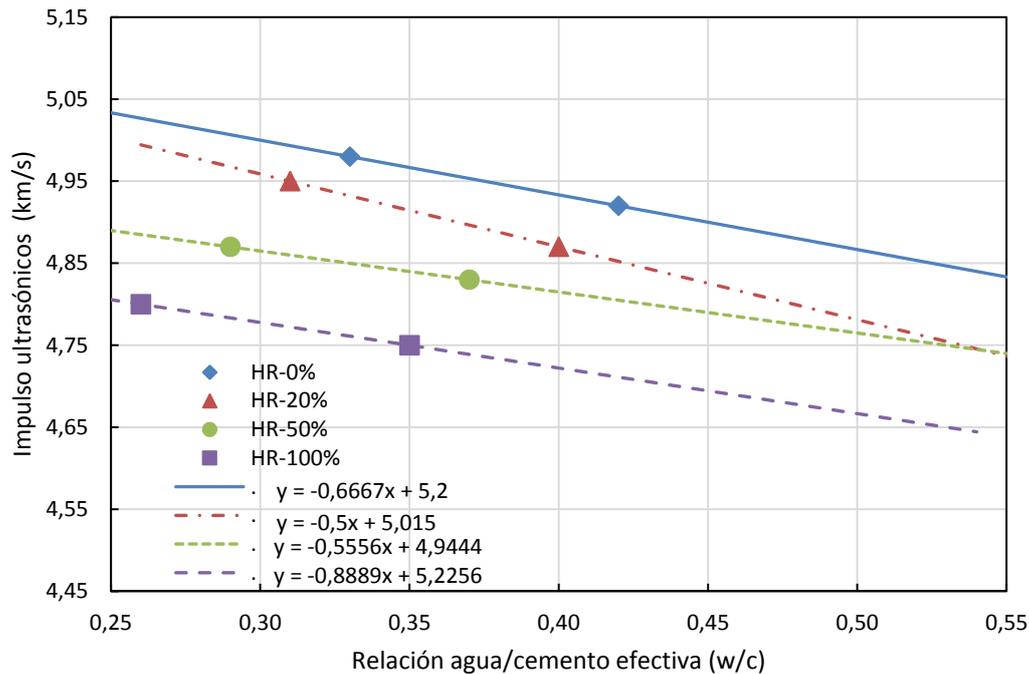


Fig. 146 Velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos frente a la relación/agua cemento efectiva de los hormigones reciclados.

Del análisis de la gráfica se deduce que la incorporación de árido grueso reciclado, a igualdad de relación agua/cemento efectiva, supone una disminución de la velocidad de los impulsos ultrasónicos en el mismo sentido que el grado de sustitución. Esta bajada se sitúa en un 5% cuando el grado de sustitución es máximo.

4.2.3.7. Caracterización por microscopía electrónica de barrido

Se realiza un estudio de la microestructura del hormigón, mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) sobre dos muestras ensayadas a compresión, de los hormigones HR-45-0% (Control) y HR-45-100%.

Junto a las fotografías siguientes, se acompañan los espectros que suministran el análisis químico por determinación de la energía de rayos x dispersado en las distintas zonas indicadas y se ha filtrado la composición de oro con el fin de poder observar mejor dichas composiciones.

La presencia del árido de naturaleza silíceo queda perfectamente reflejada en la composición del espectro (Fig. 147).

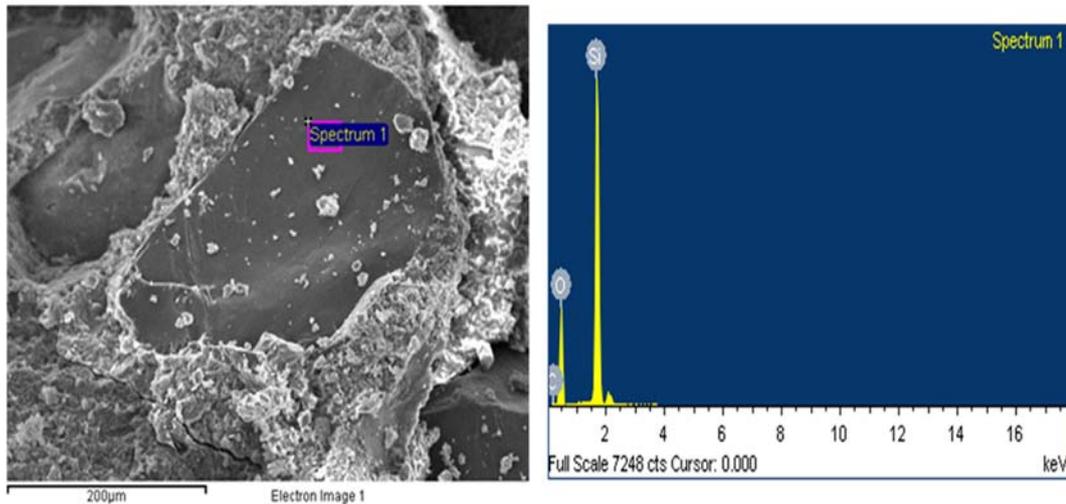


Fig. 147 Microscopía del árido del hormigón de control y su composición mineralógica.

También se puede observar la aparición de fisuras debidas a las roturas a compresión (Fig. 148).

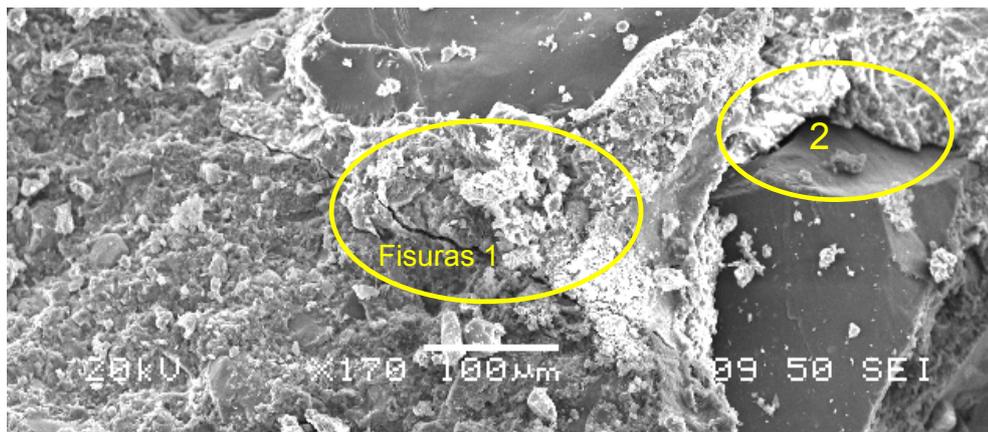


Fig. 148 Pequeñas fisuras producidas por la rotura de compresión.

Se observa que la rotura ha sido por el árido a través de la pasta lo que demuestra una buena adherencia. Sin embargo en (2) es el árido el que ha despegado por la pasta en la zona de interfase.

En la Fig. 149 se presenta la zona perimetral, la composición del espectro de la zona de mortero adherido denota una presencia mayoritaria de carbono, potasio, calcio, oxígeno, hierro, aluminio y silíceo, lo que permite estimar su composición mineralógica constituida por silicatos, aluminosilicatos y carbonatos, perfectamente englobable con la composición habitual de los morteros.

La presencia de potasio mineral, componente de las arcillas puede, relacionarse con el aditivo utilizado (Fig. 149), donde también predomina el calcio (Ca).

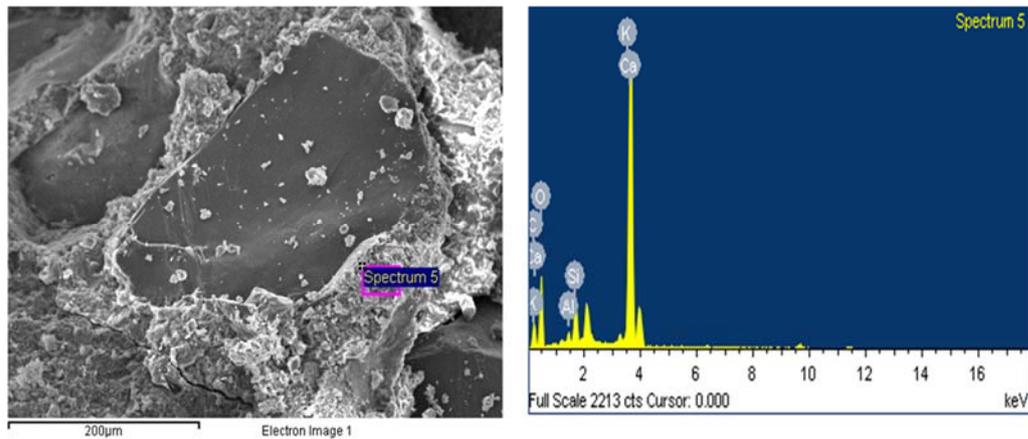


Fig. 149 Composición mineralógica de la pasta del hormigón de referencia que formará parte del nuevo hormigón reciclado.

En lo referente a las micrografías realizadas sobre una porción de hormigón reciclado, en la Fig. 150 se muestra un fragmento de hormigón con AR. En el análisis mineralógico aparecen los mismos minerales que formaban parte del mortero, con se describió anteriormente.

Se analiza la zona de nueva pasta y de los áridos dispersos con una adherencia menor debida a las fisuraciones producidas por el ensayo de compresión. La composición mineralógica de la zona central denota un espectro similar al anterior con la composición típica del mortero.

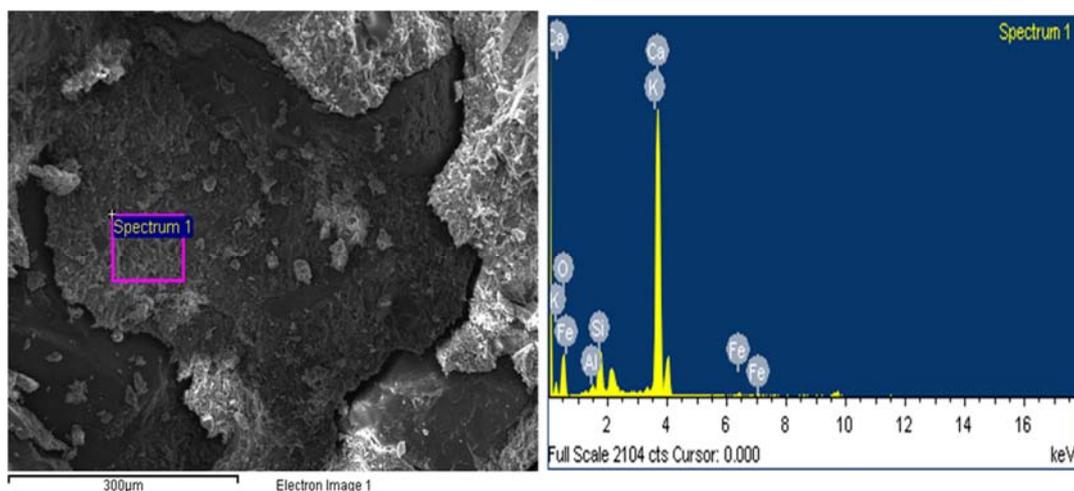


Fig. 150 Microscopía del hormigón con árido reciclado. HR-45-100%.

En la Fig. 151 se muestra una porción de hormigón elaborado con un 100% de sustitución de AR donde se especifica la zona correspondiente al árido natural (línea de puntos), adherida al mortero original en el cual también se pueden observar pequeños áridos de menor tamaño.

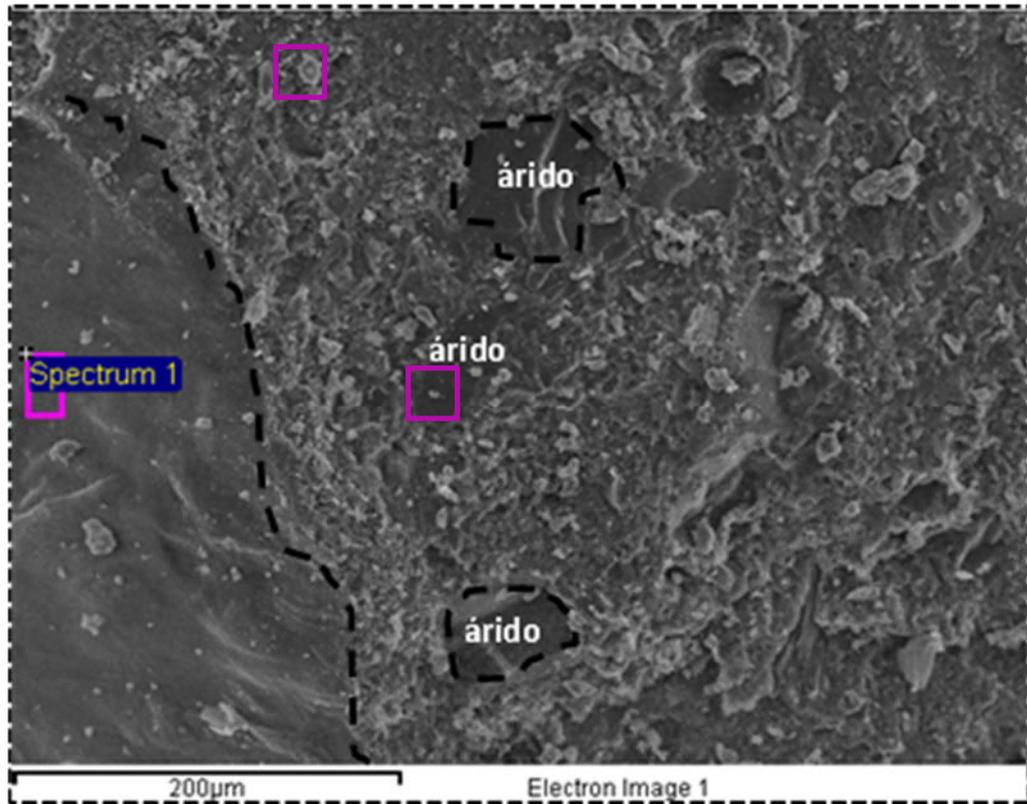


Fig. 151 Diferencia entre mortero nueva pasta y pasta antigua en una muestra con AR.

En la Fig. 152 se observa un cráter producido por un despegue de un árido y de pequeños poros producidos por pequeñas burbujas de aire producidas en el hormigón fresco.

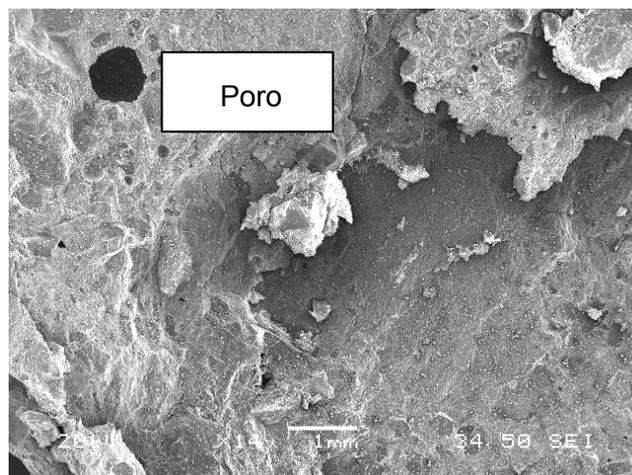


Fig. 152 Hormigón HR-45-100% donde se aprecia un cráter.

En la Fig. 153 se muestra un poro esférico, contaminado con restos de polvo procedente de la rotura, en el que aparentemente ha finalizado la propagación de una microfisura.

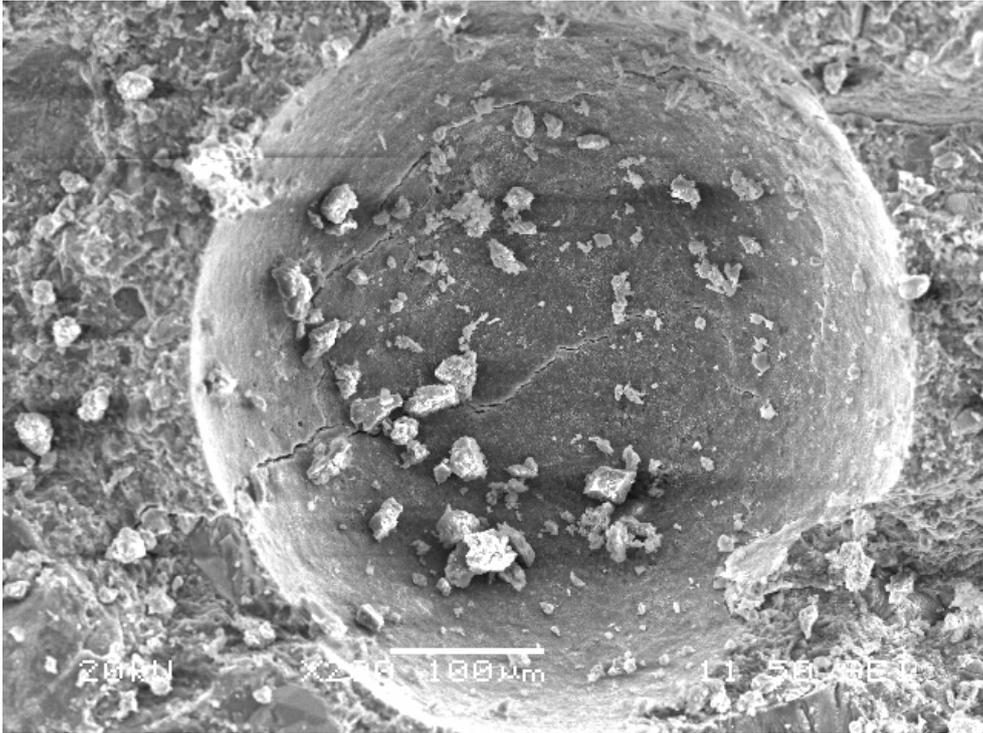


Fig. 153 Poros esférico de un HR-45-100%.

4.2.3.8. Composición mineralógica del hormigón

Se ha realizado un análisis mineralógico de una muestra de hormigón original, con el que se obtiene el árido reciclado, con el fin de descartar cualquier posible contaminación que pudiera comprometer la durabilidad. En la Fig. 154 se muestra el espectro resultante del análisis por difracción de rayos X, donde no se observa presencia de ningún compuesto cristalino diferente a los que habitualmente son encontrados en áridos de cuarzo y pastas de cemento Portland.

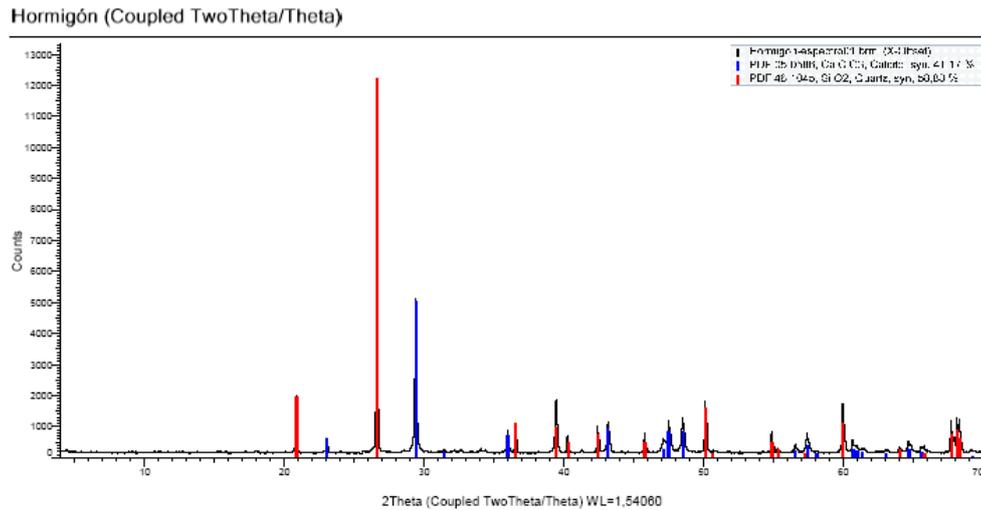


Fig. 154 Difractograma de rayos X de una muestra HR-45-100%.

4.2.3.9. Macroporosidad mediante Tomografía Axial Computarizada

Tal y como se describió en la metodología, se han realizado análisis mediante TAC comparando las propiedades del hormigón de control y el hormigón con sustitución de 100% de AR.

En la Fig. 155 se observan en planta las tres secciones realizadas. El programa permite, para cada sección, evaluar el tamaño y el volumen de los mismos. La Fig. 156, también permite filtrar por tamaño el volumen de poros apreciándose poros de mayor tamaño de color rojo.

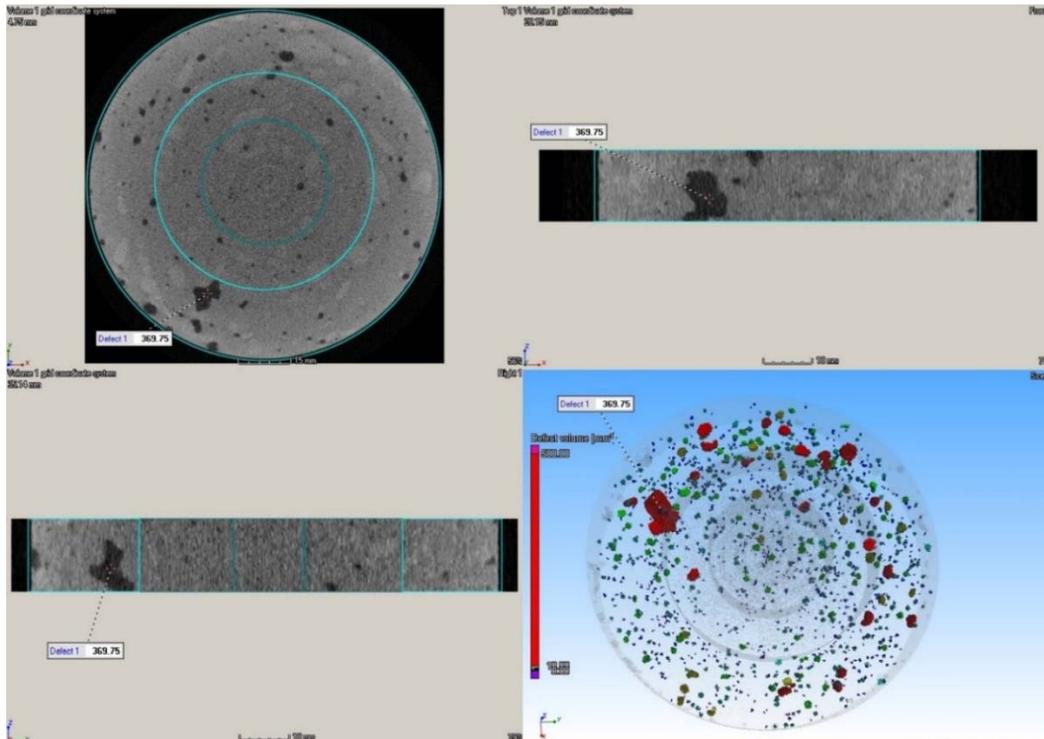


Fig. 155 Vistas generadas por el programa 3D studio.

En la Fig. 156 se aprecia el comparativo en perspectiva del hormigón patrón y el hormigón con un 100% de sustitución de AR.

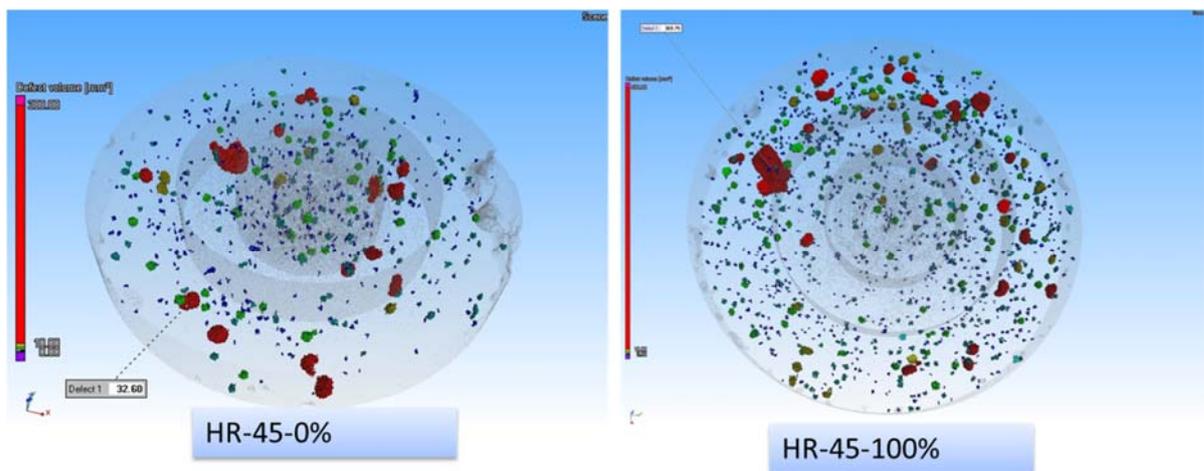


Fig. 156 Comparativo HR-45-0% y HR-45-100%.

En la Fig. 157 se evalúa la incidencia de los macroporos en el sector exterior. La zona que más macroporosidad presenta es la exterior y con 100% disminuyendo hasta igualarse hacia el interior.

1º sector (exterior)

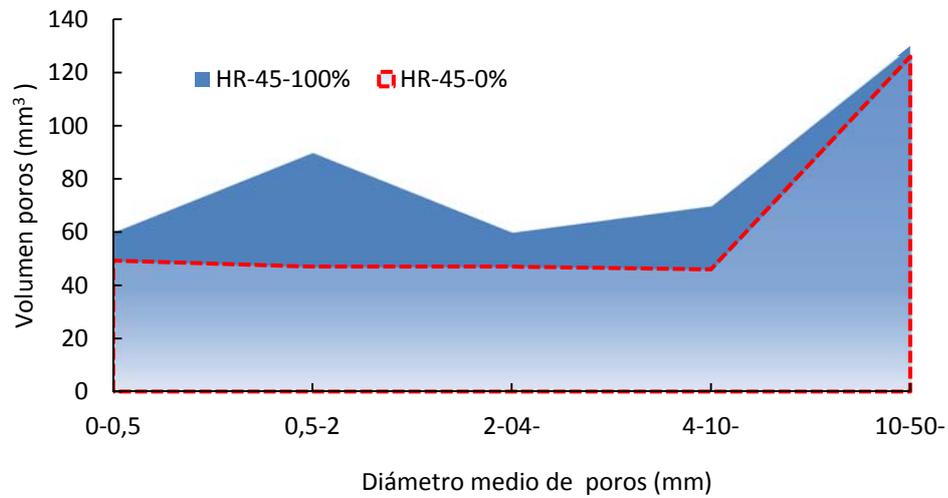


Fig. 157 Evaluación cuantitativa de los macroporos en la sección.

Se aprecia un mayor volumen de poros con el interior de las muestras de los hormigones con sustitución 100%.

En la Fig. 158 correspondiente a la evaluación de poros en el sector intermedio, se observa un mayor volumen de poros en el hormigón con 100% de sustitución.

2º sector (central)

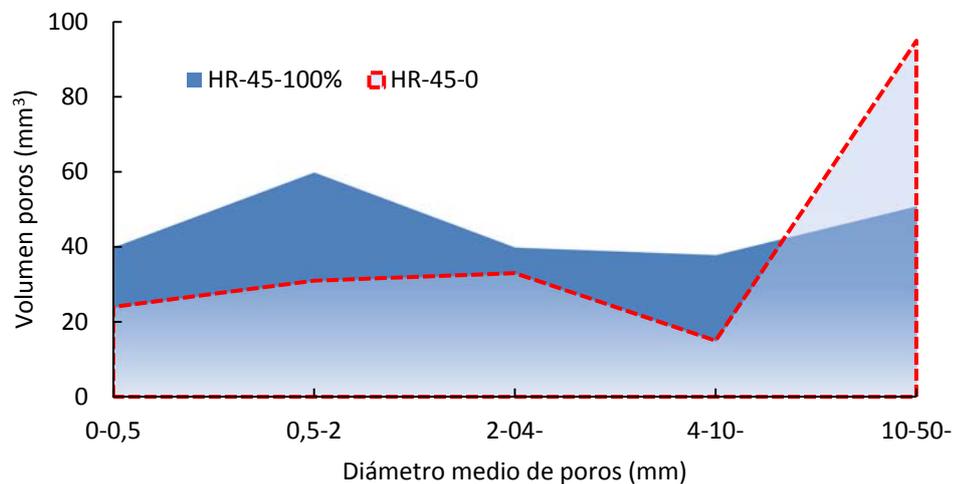


Fig. 158 Resultados de tamaño y volumen de poros en el sector central.

En la Fig. 159 se observa claramente que el volumen de poros y tamaño de los hormigones prácticamente se iguala. También se muestra que el volumen de poros de tamaño superior a 4 mm es mayor en el hormigón con AR, disminuyendo en el hormigón de control.

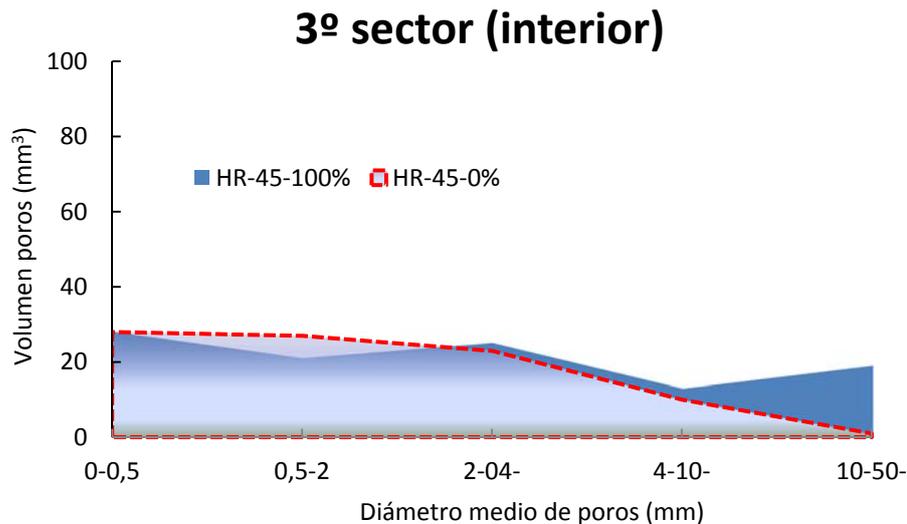


Fig. 159 Resultados tamaño y volumen de poros en el sector interior del núcleo.

Se observa una menor disminución de poros que tiende a igualarse en el interior de la muestra, lo que concuerda con las características mecánicas similares entre el hormigón patrón y reciclado. La Tabla 69 muestra los valores cuantitativos de volumen de poros aportados por el programa.

Tabla 69 Valor cuantitativo de macroporosidad HR-45-0 y HR-45-100% obtenido mediante la relación entre volumen poros y volumen aparente.

Tipo hormigón	Macroporosidad (%)
HR-45-0% (Control)	0,45
HR-45-100%	1,80

En las Fig. 160, Fig. 161, Fig. 162, Fig. 163 muestran el resultado de la composición de las tomografías diferenciando el volumen de poros, en color rojo, el mortero-árido en color gris y el tercer volumen como unión de ambos realizadas con el programa "Mimics". La diferencia entre el volumen de poros de los hormigones de referencia y de sustitución 100% muestra claramente que es mayor en este último.

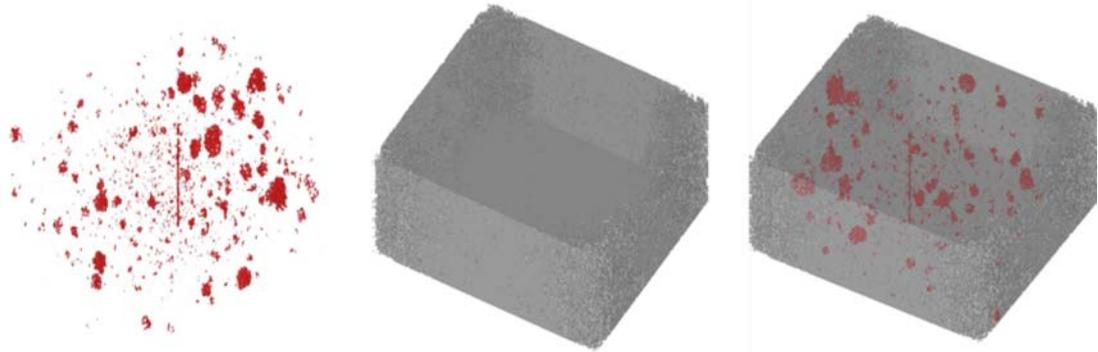


Fig. 160 Hormigón HR-30-0% (Control) resultados tomografía. Composición Poros+Mortero-Árido.

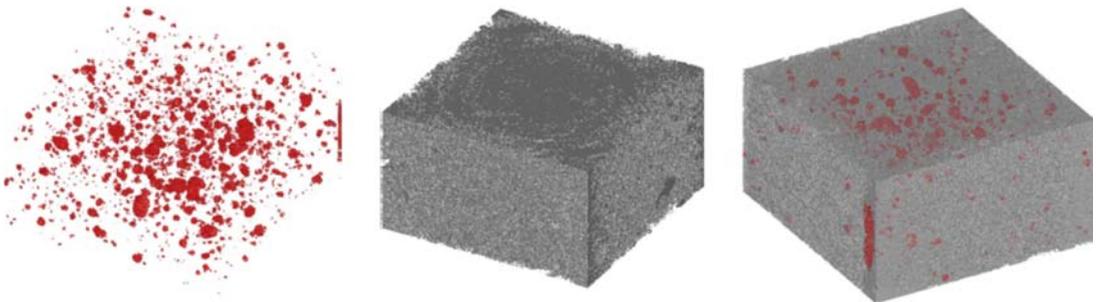


Fig. 161 Hormigón HR-30-100% resultados tomografía. composición Poros+Mortero-Árido.



Fig. 162 Hormigón HR-45-0% (Control) resultados tomografía. Composición Poros+Mortero-Árido.

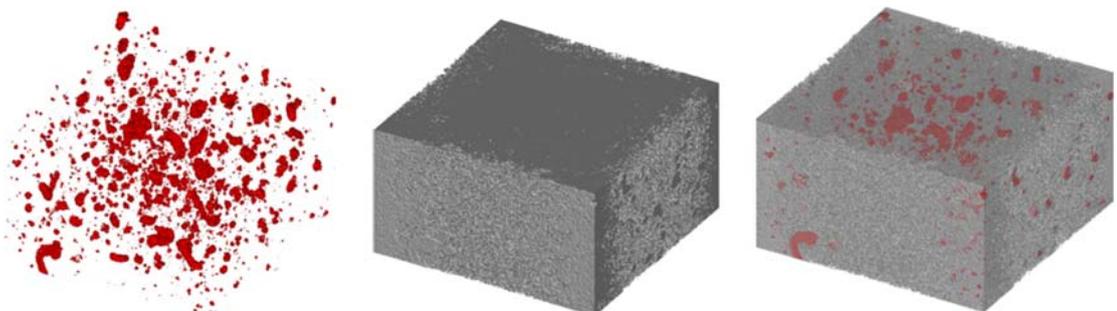


Fig. 163 Hormigón HR-45-100% resultados tomografía. Composición Poros+Mortero-Árido.

En la Tabla 70 se muestran los valores de macroporosidad resultantes entre el volumen de poros obtenido por filtrado en capa aislada y el volumen aparente obtenido por el programa antes referenciado.

Tabla 70 Resultados cuantitativos en porcentaje de macroporosidad de los hormigones estudiados obtenidos mediante el programa Mimics.

Tipo hormigón	Macroporosidad (%)
HR-30-0% (Control)	0,98
HR-30-100%	2,71
HR-45-0% (Control)	0,78
HR-45-100%	2,01

4.2.3.10. Porosidad por intrusión de mercurio

Los resultados de los valores de la microporosidad y las características morfológicas de los poros se muestran en la Tabla 71

Tabla 71 Resultados porosimetría por intrusión de mercurio.

Porosimetría por intrusión de mercurio					
Tipo	$\varnothing_{\min.}$ (nm)	$\varnothing_{\max.}$ (nm)	$\varnothing_{\text{prom.}}$ (nm)	$\varnothing_{\text{critico.}}$ (nm)	Microp.MIP(%)
HR-45-0% (Control)	7,3	215152	91,1	79,8	8,19
HR-45-100%	7,3	215167	97,2	96,9	8,53

En las gráficas de las Fig. 164 y Fig. 165 se muestra el volumen acumulado de los morteros ensayados y el pico máximo de la curva de distribución, que indica el diámetro crítico, es decir, muestra el tamaño del poro que más veces se repite de forma continuada, y que se corresponde con la pendiente de la curva del volumen intrusivo.

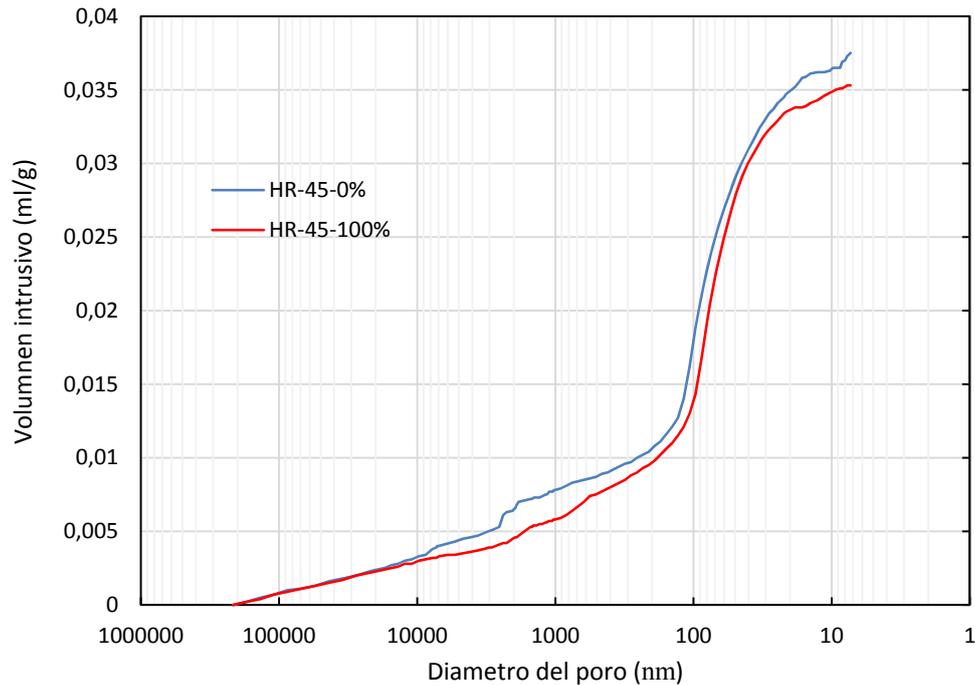


Fig. 164 Curvas de volumen intrusivo acumulado.

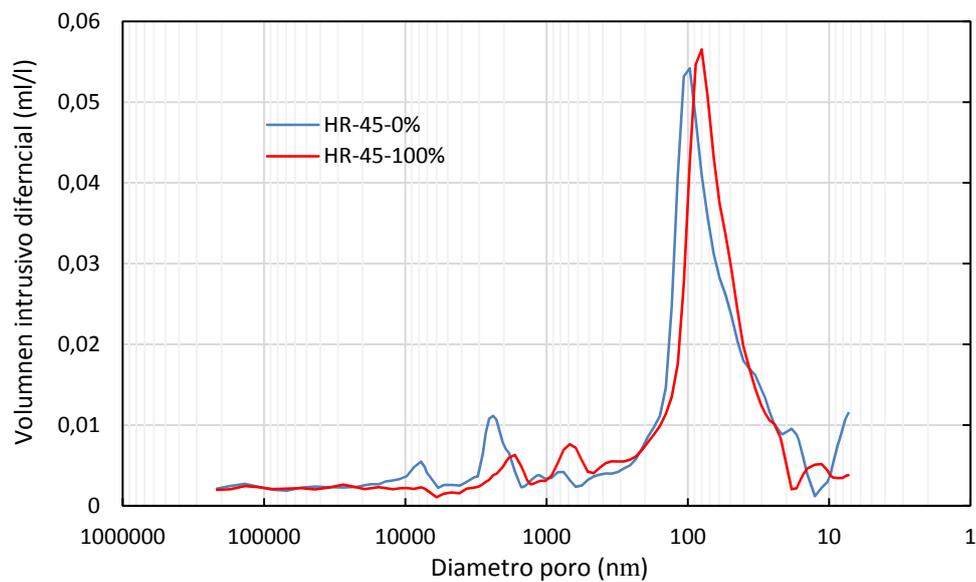


Fig. 165 Curvas derivadas del volumen intrusivo diferencial.

La gráfica de la Fig. 166 compara la distribución por volumen total intrusivo de poros, donde los rangos de porosidad son:

- $D > 1000$ nm: aire de los poros.
- $1000 < d < 100$ nm: Capilares grandes, con mayor efecto en procesos de transporte, y menor efecto de la hidratación del clínquer.
- $100 < d < 10$ nm: Capilares medios que afectan a la permeabilidad.

- $1d < 10 \text{ nm}$: Capilares pequeños que afectan a la trabajabilidad

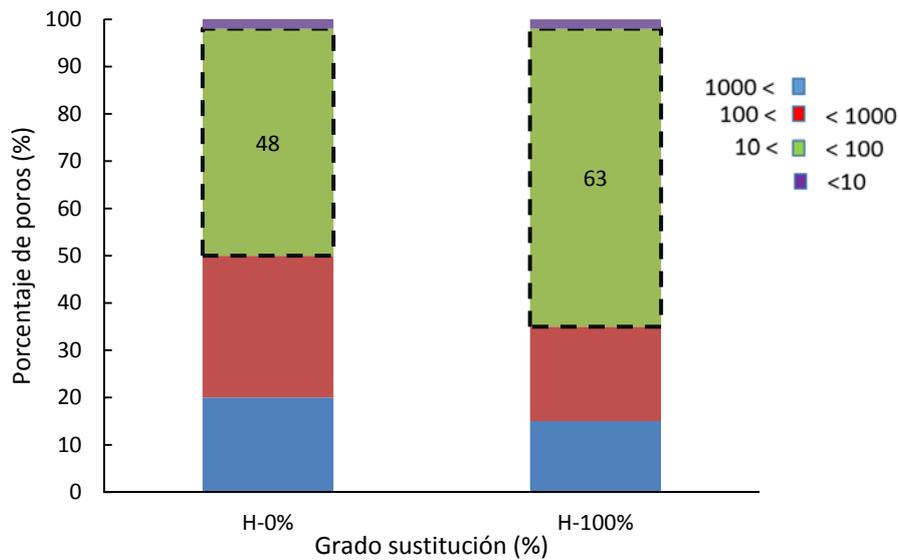


Fig. 166 Distribución volumen total intrusivo de poros.

A tenor de los resultados puede concluirse que los resultados de las porosidades son acordes a otros estudios con hormigones autocompactantes⁴⁶⁴.

Si bien los valores de microporosidad para el hormigón de control y el hormigón con 100% de sustitución de AR, son muy similares, dada la buena calidad de ambos hormigones con resistencias semejantes, sin embargo, el mayor contenido de poros se sitúa en el rango de 10-100 nm (poros de gel) para el hormigón con árido reciclado, esto es debido a que son poros que se forman en la pasta de cemento y por lo tanto se incorpora mayor contenido de pasta a través de los áridos reciclados⁴⁶⁵.

4.2.4. Procesos físicos que afectan a la durabilidad del hormigón

4.2.4.1. Fisuración por retracción

Las gráficas de las Fig. 167 y Fig. 168 que se presentan a continuación, representan la evolución de la retracción a los largo del tiempo de los hormigones con distintos grados de sustitución del árido reciclado, obteniendo un ajuste logaritmico de ecuacion (76):

⁴⁶⁴ Bermejo, E., Moragues, A., Galvez, L. and Fernández Canovas, F. (2008). "Permeabilidad y porosidad en hormigones autocompactantes." *Anales de la mecanica de la fractura* 2(25).

⁴⁶⁵ Sánchez, M. and Alaejos, P. (2012). Estudio sobre las propiedades del hormigón fabricado con áridos reciclados. Monografías CEDEX. M. d. Fomento. Madrid. **Monografías:** 220.

$$y = A\ln(x) + B \quad (76)$$

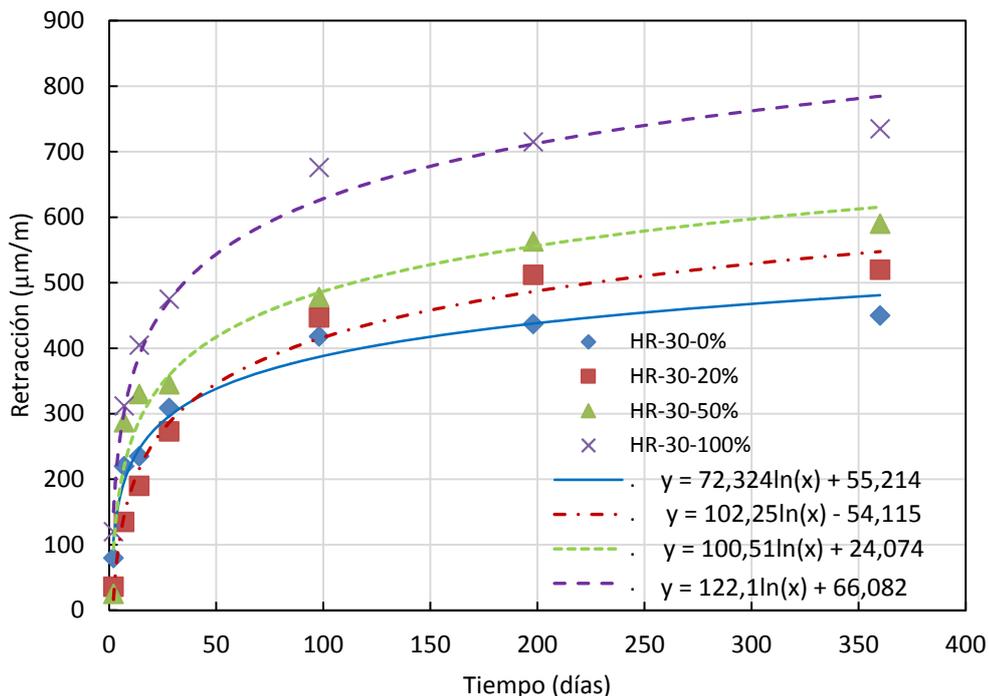


Fig. 167 Gráfico con resultados de retracción del hormigón HR-30 y correlación con tendencia logarítmica.

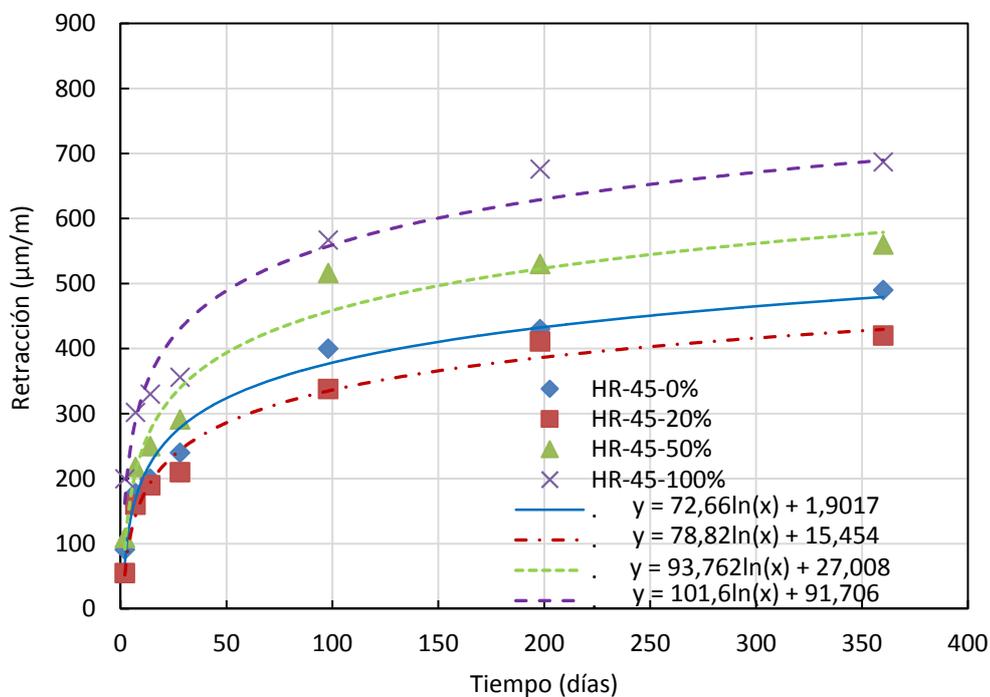


Fig. 168 Gráfico con resultados de retracción del hormigón HR-45 y correlación con tendencia logarítmica.

En general la retracción de los hormigones reciclados es mayor que la del hormigón de control, en el caso que nos ocupa no se aprecia una tendencia clara para las sustituciones de hasta un 50%.

En la Tabla 72 se especifica los incrementos de retracción en comparación al hormigón de control para la edad de 365 días.

Tabla 72 Valores de incremento de la retracción frente al hormigón de control.

Incremento respecto al hormigón de control (%)			
Tipo	20%	50%	100%
HR-30	17,5	28,2	61,0
HR-45	4,6	26,7	57,2

La correlación de los 100 días para el hormigón HR-30, supone muy poca diferencia entre las sustituciones de 20% y 50% respecto a la de control, entre 0,2-2%, resultando mucho mayor para la sustitución de un 100%, con un aumento del 37%.

Las pendientes de los ajustes son más pronunciadas en los primeros 90 días, existiendo también incrementos en la pendiente de la curva desde solo un 2%, entre el 0-2%, hasta un 11% y 25% para las sustituciones de 50% y 100%.

En cualquier caso ha de tenerse en cuenta que los hormigones autocompactantes son susceptibles de experimentar “per se” una mayor retracción y la bibliografía así confirma como el origen de la retracción autógena es debido a la mayor cantidad de pasta.

La relación entre los valores de retracción en función de su relación agua/cemento efectiva a la edad de 28 y 365 días se muestran en las Fig. 168 y Fig. 170. A falta de bibliografía específica que relacione estos dos parámetros, el ajuste efectuado óptimo se adapta a una curva logarítmica creciente cuyos valores A y B se especifican en las gráficas antes mencionadas y cuya forma es la siguiente (77):

$$y = A \ln(x) + B \quad (77)$$

Se observa un aumento de la retracción con el grado de sustitución y a medida que aumenta la relación agua/cemento efectiva. Las curvas del hormigón de control y del hormigón con sustitución del 20% son semejantes. Existe una cierta variación en la curva de sustitución de un 50% y la mayor diferencia se da en la curva de sustitución del 100% cuyo aumento supone de media un 28% para una misma relación agua/cemento efectiva, valores menores a los comparados anteriormente

según el grado de sustitución. Se observa que las curvas adquieren menos inclinación a medida que aumenta la edad.

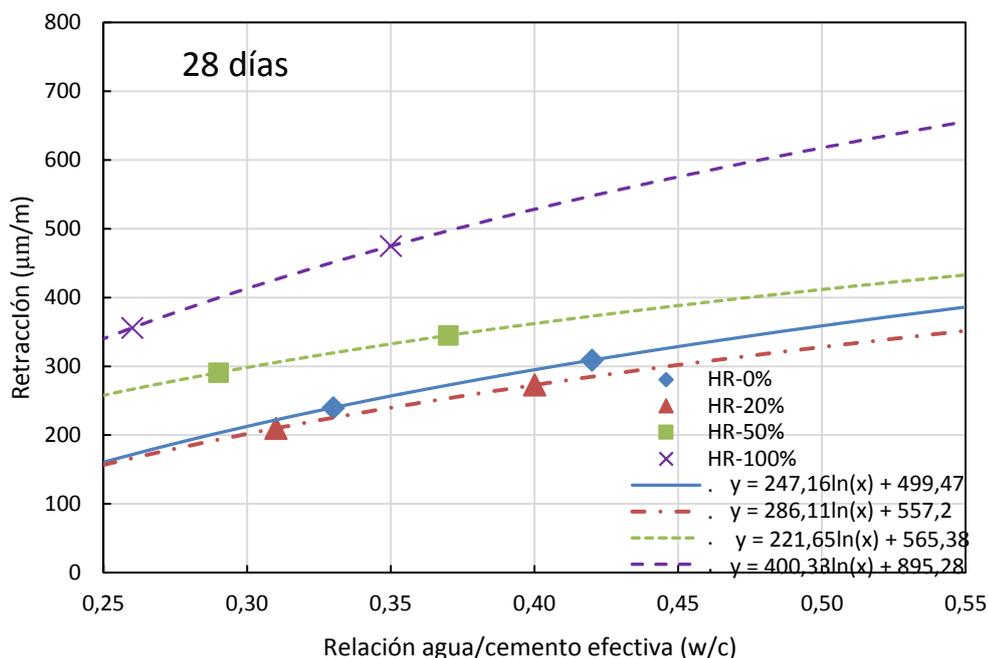


Fig. 169 Gráfica de retracción a la edad de 28 días en función de su relación agua/cemento efectiva.

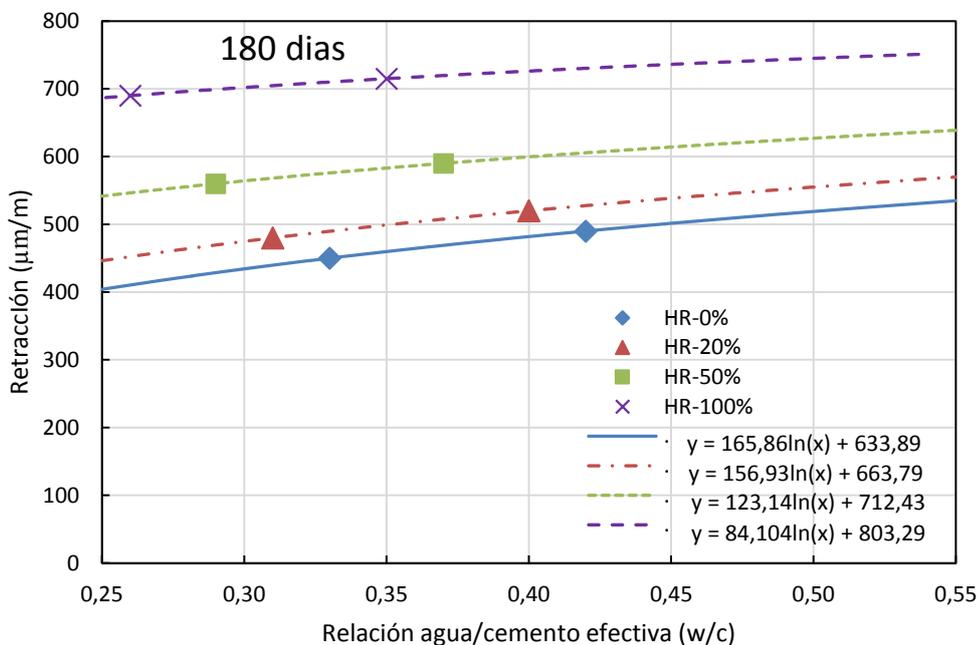


Fig. 170 Gráfica retracción a la edad de 365 días en función de su relación agua/cemento efectiva.

Los resultados entre el hormigón HR-45-100%-S dosificadas con áridos reciclados presaturados previamente (Fase 2) y los dosificadas con áridos secos HR-45-100%, se muestran en la Fig. 171.

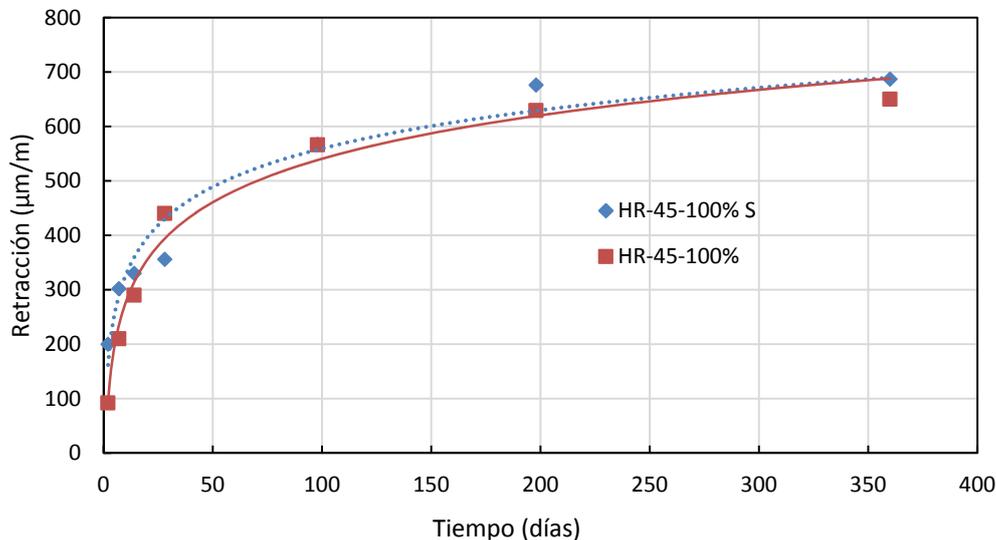


Fig. 171 Resultados comparativos entre los valores obtenidos con áridos presaturados y sin presaturar.

Se observa que la gráfica correspondiente al HR-45-100%-S, con áridos presaturados, muestra un leve aumento de la retracción respecto a HR-45-100%, siendo ésta más acusada hasta los 28 días. Dicho efecto es debido al aumento de la relación agua/cemento efectiva que supone la presaturación de los áridos, para luego estabilizarse.

Atendiendo a la metodología referenciada en el Apartado 3.4.4.1 de la página 168 se adjunta la aplicación a la Normativa española en vigor EHE-08 y código ACI los valores empleados en dicha formulación son para la EHE-08 los siguientes:

- *Humedad media resultante a partir de los diagramas anuales de humedad y temperatura del 65% correspondiente para un ambiente Ila, con curado de 28 días.*
- *$f_{ck} = 30 \text{ MPa}$ y 45 MPa si bien los valores reales son superiores a los teóricos*

Atendiendo al **código ACI** los valores tomados añadidos a los ya conocidos son:

- *Relación entre el contenido de árido fino respecto al contenido total de árido en %: 0,91.*
- *Relación entre el volumen y superficie de la probeta: 16,4.*

- Contenido de cemento 320 kg y 250 kg para relaciones w/c de 0,35 y 0,45 respectivamente.
- Coeficiente $\alpha = 0,9$: porcentaje de aire ocluido comprendido entre 0,9-1,1.

Los gráficos Fig. 172 y Fig. 173 muestran comparativamente los resultados de los hormigones catalogados como HR-45 y HR-30 y los resultados del código ACI y EHE.

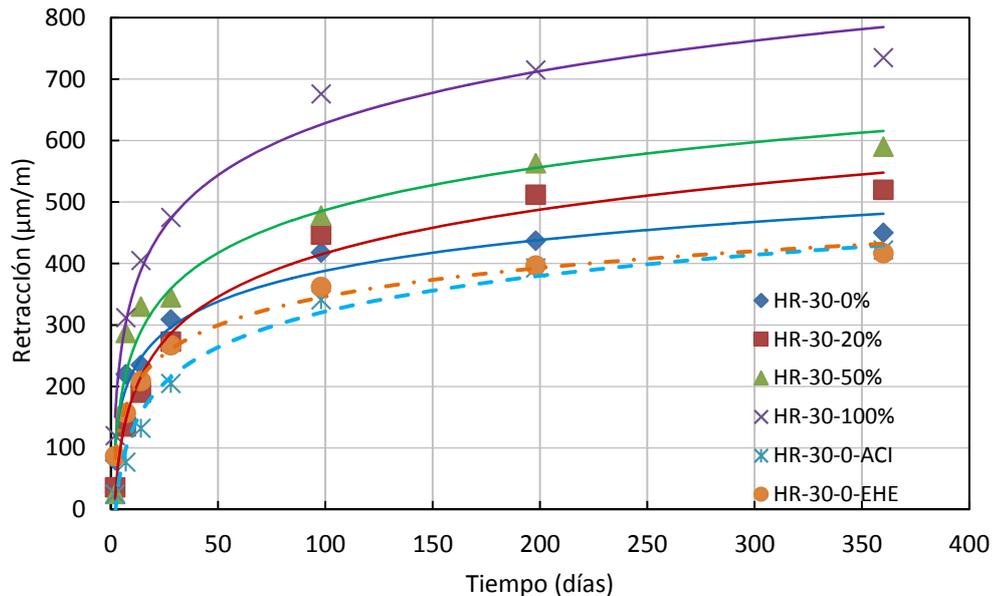


Fig. 172 Comparativo de los resultados programa experimental con los cálculos efectuados según EHE-08⁴⁶⁶ y código ACI⁴⁶⁷.

Como se puede comprobar, las líneas del código ACI se adaptan mejor al estudio experimental realizado, que las resultantes del cálculo mediante la formulación de la EHE.

⁴⁶⁶ EHE-08 (2008). Instrucción Española del Hormigón Estructural. Madrid, Ministerio de Fomento.

⁴⁶⁷ ACI-318-SR-05 (2002). Structural Concrete. A. c. Institute. Michigan.

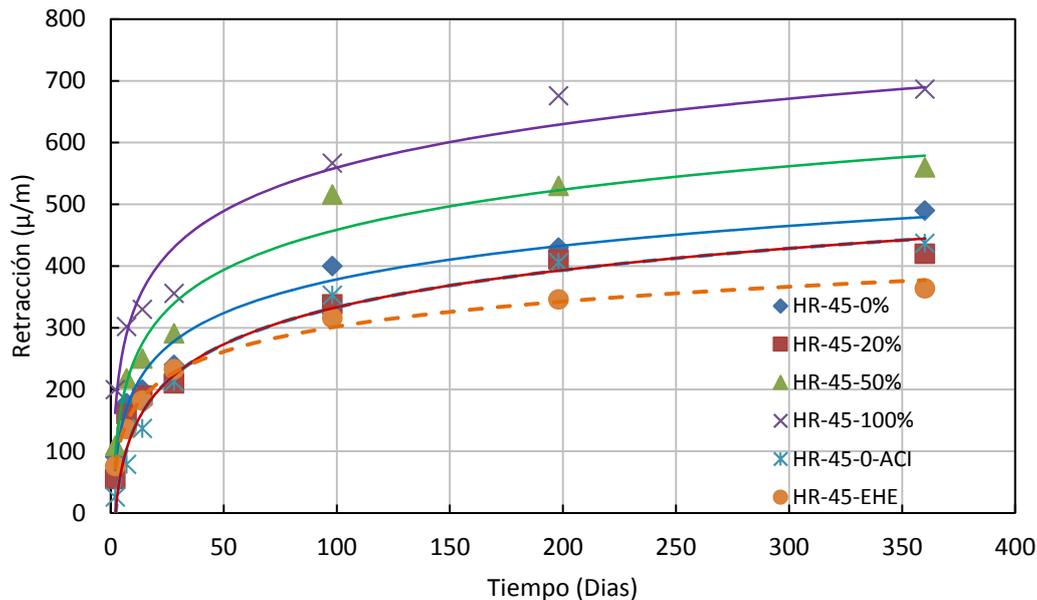


Fig. 173 Comparativo ACI-EHE para el hormigón HR-45.

4.2.4.1.1. Relación entre la resistencia a compresión y la retracción

Si representamos en una gráfica lineal, atendiendo a estudios consultados⁴⁶⁸, la influencia de la resistencia a compresión en la retracción del hormigón para los valores obtenidos de las dos clases de hormigones y para todas las sustituciones, se obtiene una disminución de la retracción con el aumento de resistencia para cada categoría resistente Fig. 174 y para la edad de 28 días.

El aumento de retracción es más acusado para el grado de sustitución de 100% a medida que disminuye la resistencia, lo que demuestra la influencia del árido reciclado frente a la pasta para la edad de 28 días.

Los resultados obtenidos permiten comparar también la retracción a los 180 días, Fig. 175. Se observa que las mayores diferencias se encuentran para resistencias bajas, lo que supone mayores valores de retracciones. Inversamente, las rectas de ajuste confluyen para resistencias altas coincidiendo con valores menores de retracción revelando un comportamiento similar entre el árido reciclado y la pasta nueva. También resulta que la tendencia de las rectas obtenidas posee una muy leve inclinación coincidiendo más con otros estudios y con la CEB.

⁴⁶⁸ Sánchez, M. and Alaejos, P. (2012). Estudio sobre las propiedades del hormigón fabricado con áridos reciclados. Monografías CEDEX. M. d. Fomento. Madrid. **Monografías:** 220.

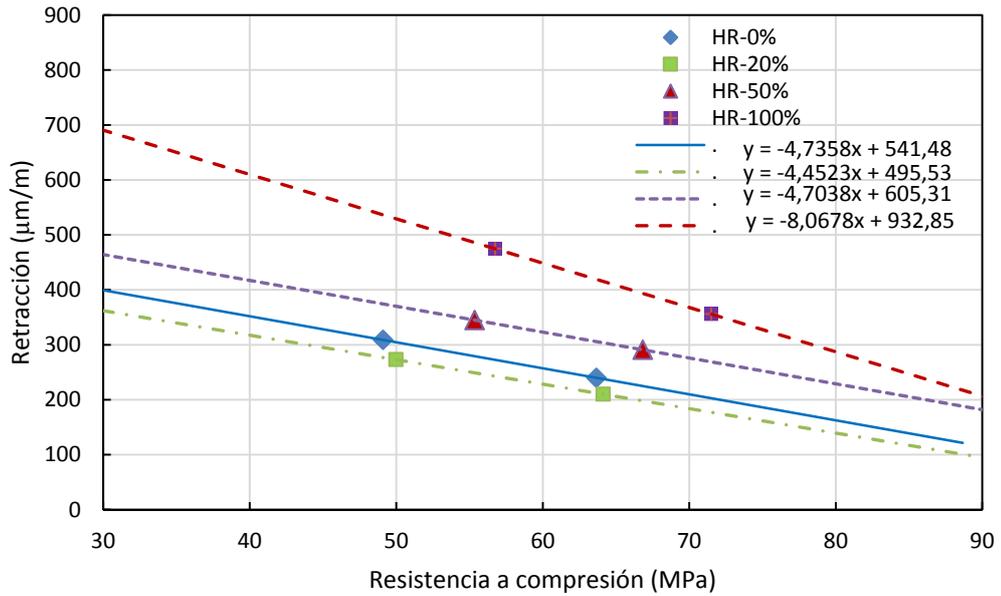


Fig. 174 Correlación entre la retracción y resistencia a compresión para la edad de 28 días.

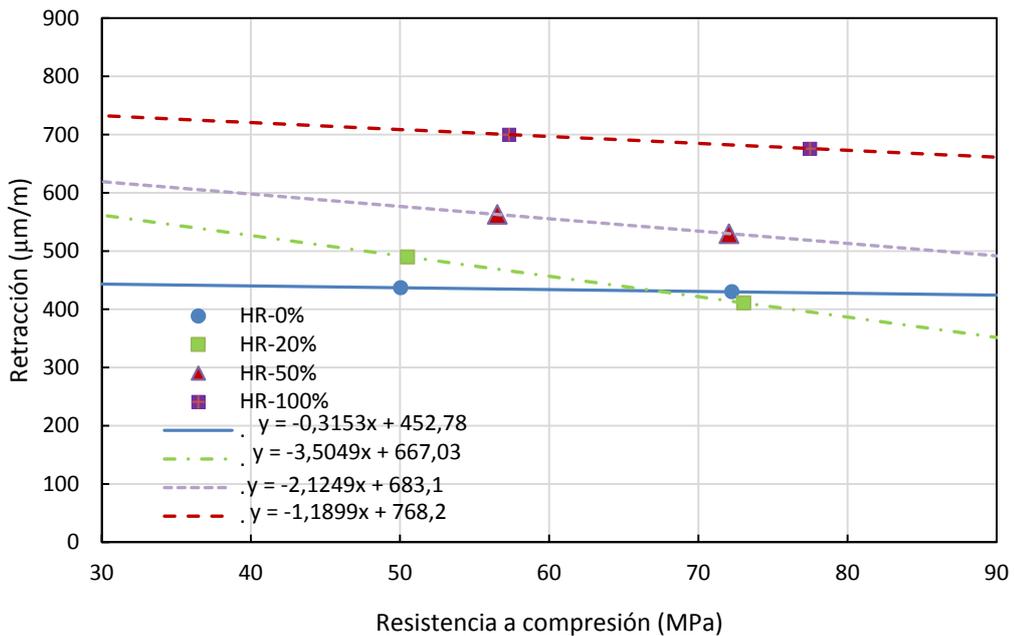


Fig. 175 Correlación entre la retracción y resistencia a compresión para la edad de 180 días.

4.2.4.1.2. Relación entre la retracción del hormigón de control y el hormigón reciclado

En la Fig. 176 se representan los valores de retracción del hormigón más representativo ensayado, frente al hormigón de control correspondiente.

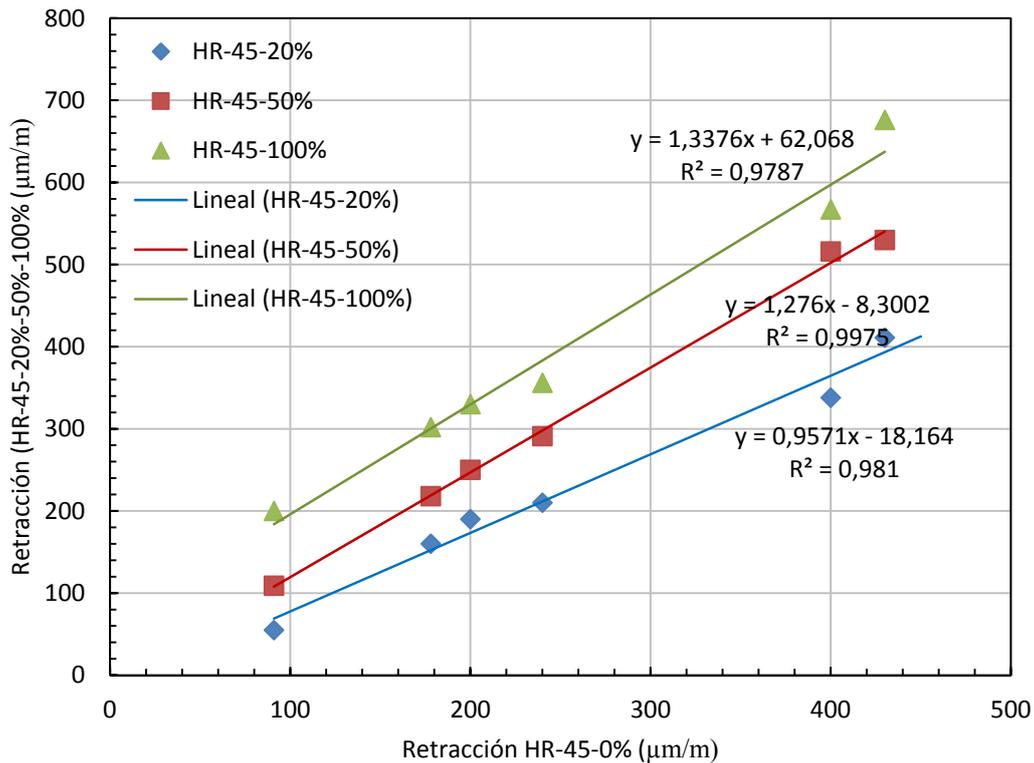


Fig. 176 Comparativo entre el hormigón de control y los hormigones con sustitución de AR de 20%, 50%, 100%.

Al relacionar la retracción del hormigón de control con la del árido reciclado a las distintas edades ensayadas, se pueden obtener rectas de regresión en función de los porcentajes de árido reciclado utilizado (78).

$$R_{HR} = a + bR_{CO} \quad (78)$$

Siendo:

R_{HR} retracción del hormigón reciclado.

R_{CO} retracción hormigón control.

Se han obtenido regresiones lineales, ya que son las que mejor se adaptan (Fig. 176). En la Tabla 73 se adjuntan los resultados de interpolar en la recta a partir de coeficientes a y b dando como resultado la media.

Tabla 73 Valores de interpolación lineal resultantes de la comparativa entre la retracción de control y la retracción del hormigón reciclado y resultado medio.

TIPO	Valor de retracción según grado de sustitución ($\mu\text{m/m}$)			
	0% (Control)	20%	50%	100%
HR-45-20%	172	418		
HR-45-50%	243		563	
HR-45-100%	328			672
Resultado coeficiente medio				
p (media)	0	0,84	1,17	1,47

En la Tabla 72 se especifican y relacionan los coeficientes obtenidos respecto de otras normas y estudios.

Tabla 74 Factor de corrección según diferentes Normas y estudios.

Factor de corrección p	Factor de corrección p	
	100% sustitución	20%
Belgium	1,5	1
Rilem	1,5	1
The Netherland	1,35-1,55	1
Estado del arte	1,23 * (valor medio)	1,03
Estudio experimental Artepref	1,47	0,83

4.2.4.1.3. Análisis de los factores que influyen en la retracción del hormigón reciclado

Los valores de la retracción resultantes del estudio experimental, son superiores a los obtenidos en el estado del arte y son también mayores que los calculados mediante las fórmulas del Código ACI, que en general es el que mejor se ajusta a los resultados experimentales, porque tiene en cuenta una serie de parámetros no considerados en otras normativas como la EHE.

En relación a la calidad de origen de AR

Algunos estudios⁴⁶⁹ sostienen que el hormigón reciclado fabricado con árido procedente de hormigón de elevada resistencia presenta mayor retracción que con árido de peor calidad. Esto puede suceder cuando el hormigón de origen tiene una

⁴⁶⁹ Ravindrarajha, R. and Tam, c. (1987). "Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate." *Magacin of Concrete Research* 37(130): 29-38.

reducida relación w/c, como es nuestro caso, en el que las piezas prefabricadas proceden de piezas de elevada resistencia (HAC 45-50) y con w/c=0,35-0,45. También, la mayor proporción de mortero adherido supone un gravamen sobre este último factor.

En relación al hormigón autocompactante

Estudios específicos⁴⁷⁰ de hormigón autocompactante (HAC) analizan y predicen la retracción en este tipo de hormigones ya que las combinaciones de los diversos componentes, tales como áridos, cemento, superplastificante, agente reductor de agua y otros ingredientes afectan de manera especial a las propiedades de la HAC.

El empleo de hormigón autocompactante (HAC) supone dos factores determinantes, uno el empleo de tamaño de árido menor al del hormigón tradicional (a mayor tamaño de árido menor retracción) y, segundo e inherente al anterior, menor tamaño de árido y mayor volumen de pasta debido a la incorporación de finos.

Los estudios experimentales realizados⁴⁷¹, demuestran que los hormigones autocompactantes tienen retracciones más elevadas, debido a que la mezcla de aquellos presenta un mayor volumen de pasta que la mezcla de los hormigones convencionales.

La gráfica de la Fig. 177, basada en el trabajo de los mencionados autores, relaciona los valores de la retracción a 91 días con dosificaciones preparadas con distintos volúmenes de pasta, pudiéndose apreciar que la retracción está estrechamente relacionada con el volumen de pasta de la mezcla.

Existe una relación lineal con un coeficiente de correlación de $R^2 = 0,85$ y se evidencia que cuando se incrementa el volumen de pasta aumenta la retracción. A partir de esta premisa se realiza un cálculo del volumen de pasta previsto en la dosificación de los hormigones HR-45 y HR-30 que se detalla a continuación. Dicho valor contrasta con el volumen de pasta correspondiente al hormigón convencional equivalente, al que llamaremos hormigón vibrado.

La comparación entre volumen de pasta de cemento de hormigón convencional y autocompactable se expone a continuación en las Tabla 75 y Tabla 76.

⁴⁷⁰ Farhad, A. and Shami, N. (2011). "Shrinkage behavior of self-compacting concrete." *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A* **13(6)**: 407-419.

⁴⁷¹ Loser, R. and Leeman, A. (2009). "Shrinkage and restrained shrinkage cracking of self-compacting concrete compared to conventionally vibrated concrete." *Materiales and Structures* **42**: 71-82.

Tabla 75 Diferencia de volumen de pasta y el incremento de la retracción para HR-30.

Diferencia litros pasta para el HR-30 programa experimental						
Proporción	Hormigón autocompactable			Hormigón vibrado		
	kg	densidad (t/m ³)	Volumen pasta (l)	kg	densidad (t/m ³)	Volumen pasta (l)
Agua (l)	110	1	112,50	275	1	137,5
Cemento kg	250	2,10	80,64	275	2,10	88,7
Filler kg	305	2,68	115,09	(-)	(-)	(-)
Aditivo kg			5,7			2
Total pasta			308,93			226,2
Diferencia 308,2-226,9= 82 litros						

Tabla 76 Diferencia de volumen de pasta y el incremento de la retracción para HR-45.

Diferencia litros pasta para el HR-45 programa experimental						
proporción	Hormigón autocompactante			Hormigón vibrado		
	kg	densidad (t/m ³)	Volumen pasta (l)	kg	densidad (t/m ³)	Volumen pasta (l)
Agua	110	1	113	350	1	157,5
Cemento	325	2,1 t/m ³	104,8	350	2,1 t/m ³	112,9
Filler	280	2,68 t/m ³	105,5	(-)	(-)	(-)
Aditivo			5,7			2
Total pasta			329,8			274,9 litros
Diferencia 329,8-274,9=59,8 = 60 litros						

En la Fig. 177 se representa la correlación entre el volumen de pasta y la retracción a los 91 días.

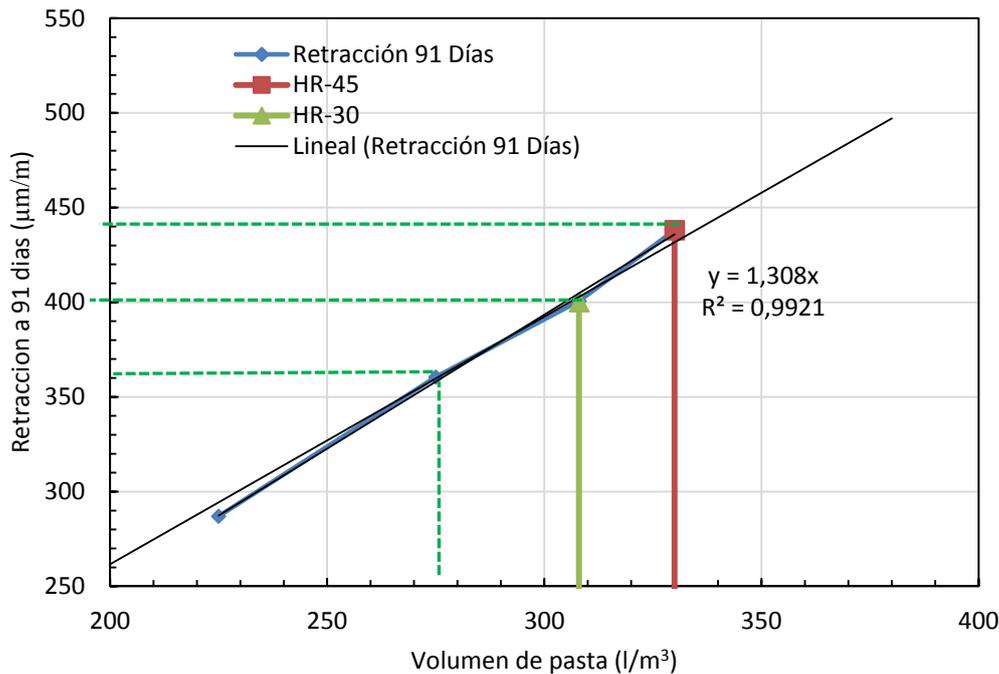


Fig. 177 Correlación entre el volumen de pasta y retracción asignada a la línea de tendencia con la recta de Loser⁴⁷².

La gráfica anterior recoge los estudios de Loser, que analiza el incremento de la retracción cuando aumenta el volumen de pasta. El resumen se refleja en la Tabla 94.

Tabla 77 Diferencia de retracción resultante de utilizar diferentes volúmenes de pasta.

	HR-45		HR-30	
Litros de pasta (l)	330	275	308	226
Retracción (µm)	438	360	400	287
Dif. retracción	78		113	

Por lo tanto se demuestra que la retracción obtenida en la presente experimentación, para 100% de AR (HR-30), es aproximadamente igual a la suma de la retracción de la experimentación de Alaejos-Sánchez⁴⁷³ (hormigón convencional) más el incremento provocado por el volumen de pasta.

Concluyendo, se comprueba que la diferencia entre un hormigón autocompactante y un hormigón vibrado tradicional comparando los resultados obtenidos, se obtienen aumentos de 28,2 % para el hormigón HR-30 y de 18,8% para hormigón HR-45.

⁴⁷² Ibid.

⁴⁷³ Sánchez, M. and Alaejos, P. (2012). Estudio sobre las propiedades del hormigón fabricado con áridos reciclados. Monografías CEDEX. M. d. Fomento. Madrid. Monografías: 220.

4.2.4.1.4. Aplicación de la utilización de aditivos reductores de la retracción

Para solventar este efecto de incremento de retracción de los hormigones autocompactantes, debido al incremento de pasta, se ha consultado con una empresa especializada la utilización de aditivos reductores. Los aditivos reductores en cierta proporción, tal y como sostiene Loser, supone una reducción entre un 10% y un 30% de la retracción.

Los aditivos empleados, según la Hoja Técnica aportada por el fabricante⁴⁷⁴ "La retracción total es disminuida entre un **25% y un 30%** a 28 días con 50% de humedad HR y temperatura de 20° C. En función de la cantidad de aditivo empleada y de la dosificación del hormigón o mortero". Podríamos decir que en algunos casos alcanza **hasta el 40%**, dependiendo de los factores implicados y que los ensayos de retracción a 56-90 días con la misma tendencia. La dosificación óptima se encuentra entre un 2-3% de aditivo. En la Fig. 178 se muestran los estados obtenidos.

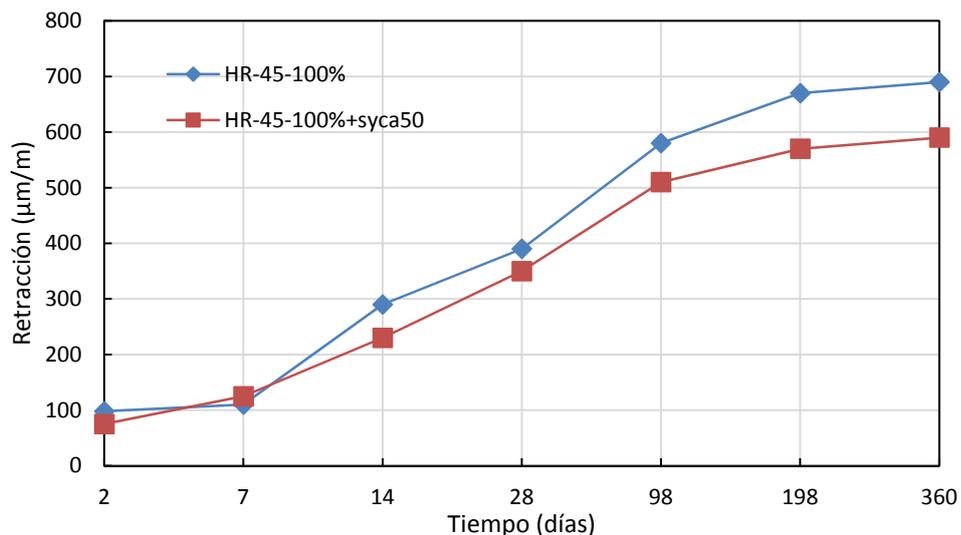


Fig. 178 Gráfica de la retracción comparativa de hormigones con empleo de aditivo reductor Sika-50.

Las reducciones obtenidas a 360 días son de un 17% del hormigón dosificado con aditivo reductor en comparación al hormigón sin incorporación de aditivo reductor.

Autores como Linchabiya⁴⁷⁵ obtiene reducciones en los valores retracción entre un 14-20% incorporando cenizas volantes.

⁴⁷⁴ Sika SAU, Producto utilizado reductor Sika Control 50 "Aditivo reductor de la retracción para hormigones y morteros"

⁴⁷⁵ Limbachiya, M., Meddah, M. S. and Ouchagour, Y. (2012). "Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete." *Construction and Building Materials* 27(1): 439-449.

4.2.4.2. Envejecimiento por ciclos de hielo-deshielo

Las Tabla 78 y Tabla 79 muestra los resultados de pérdida de peso en los correspondientes ciclos aplicados para los hormigones catalogados como HR-30 y HR-45.

Tabla 78 Resultados de pérdida de peso para la dosificación HR-30.

Ensayo de heladicidad pérdida de peso (%) Ciclos 7-18-28-42-56 días. Probetas curado normalizado.

TIPO HR CICLO	7	18	28	42	56
HR-30-0 (Control)	0,75	0,90	2,50	3,90	5,85
HR-30-20%	0,41	0,83	1,55	2,60	4,74
HR-30-50%	0,51	0,89	1,22	8,95	12,57
HR-30-100%	2,1	4,63	9,56	12,30	15,87

Tabla 79 Resultados de pérdida de peso para la dosificación HR-45.

Ensayo de heladicidad pérdida de peso (%) Ciclos 7-18-28-42-56 días. Probetas curado normalizadas.

TIPO HR CICLO	7	18	28	42	56
HR-45-0% (Control)	0,61	0,74	1,54	3,08	4,68
HR-45-20%	0,28	0,67	0,86	1,86	3,16
HR-45-50%	0,71	1,99	2,58	4,51	8,14
HR-45-100%	0,79	2,18	3,47	5,23	9,50

Las Tabla 80 y Tabla 81 muestran la inspección visual realizada después de los ciclos 28 y 56 observándose la evolución del aspecto y pérdida de material afectado.

Los resultados reflejan dos comportamientos distintos, diferenciados por la dosificación empleada. Para los hormigones con menor relación agua/cemento w/c (0,45) correspondiente al HR-30 la pérdida de peso a medida que avanzan los ciclos es significativamente mayor. Varios estudios han detectado un peor comportamiento del árido reciclado para dosificaciones con relaciones w/c mayores⁴⁷⁶.

Para la dosificación de menor relación w/c (0,35), correspondiente a la resistencia de HR-45, los valores de pérdida de peso son también apreciables sin sobrepasar, para el más desfavorable, el 10%.

⁴⁷⁶ Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F. and Wirquin, E. (2004). "Frost resistance of recycled aggregate concrete." *Cement and Concrete Research* 34(10): 1927-1932.

Tabla 80 Inspección visual después de los 28- 56 ciclos (HR-30).

Inspección visual HR-30			
	28 ciclos	56 ciclos	Daño
HR-30-0%			Leve con perdida lechada superficial
HR-30-20%			Leve con perdida lechada superficial
HR-30-50%			Moderado perdida lechada y pasta
HR-30-100%			Moderado perdida pasta todas las caras

Tabla 81 Inspección visual realizada y comparativo entre 28-56 ciclos (HR-45)

Inspección visual HR-45			
	28 ciclos	56 ciclos	Daño
HR-45-0%			Leve con perdida lechada superficial en alguna cara

Inspección visual HR-45

	28 ciclos	56 ciclos	Daño
HR-45-20%			Leve con pérdida lechada superficial
HR-45-50%			Moderado pérdida de pasta
HR-45-100%			Moderado pérdida de pasta

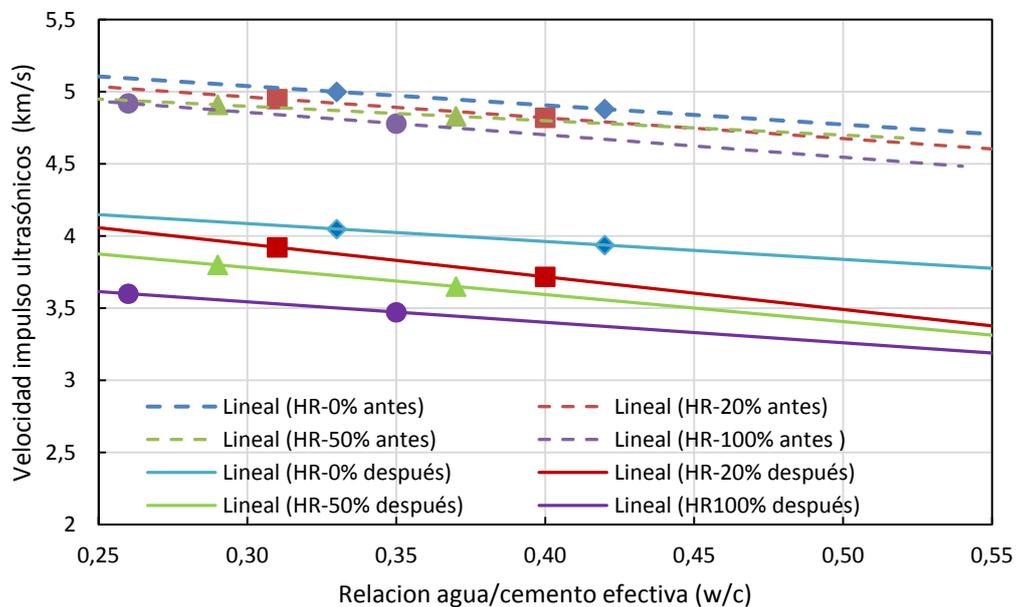


Fig. 179 Gráfico de velocidad de impulsos ultrasónicos en relación al agua cemento/ efectiva antes y después del ensayo.

Las disminuciones de velocidad de ultrasonidos, entre un 15% y 27%, se deben atribuir a la falta de planeidad de las caras de las probetas tras la erosión producida por los ciclos hielo-deshielo.

En la Fig. 180 se especifican los resultados de resistencia a compresión antes y después de los ciclos efectuados en el ensayo de heladicidad, observándose descensos de resistencia en todos los hormigones, si bien la tendencia es a aumentar la resistencia para relación de agua/cemento menores. Para la dosificación de mayor w/c (HR-30), las resistencias suponen descensos de entre un 8% para la sustitución de un 20% y de un 30% para la sustitución de un 100% AR respecto de las probetas tomadas como referencia.

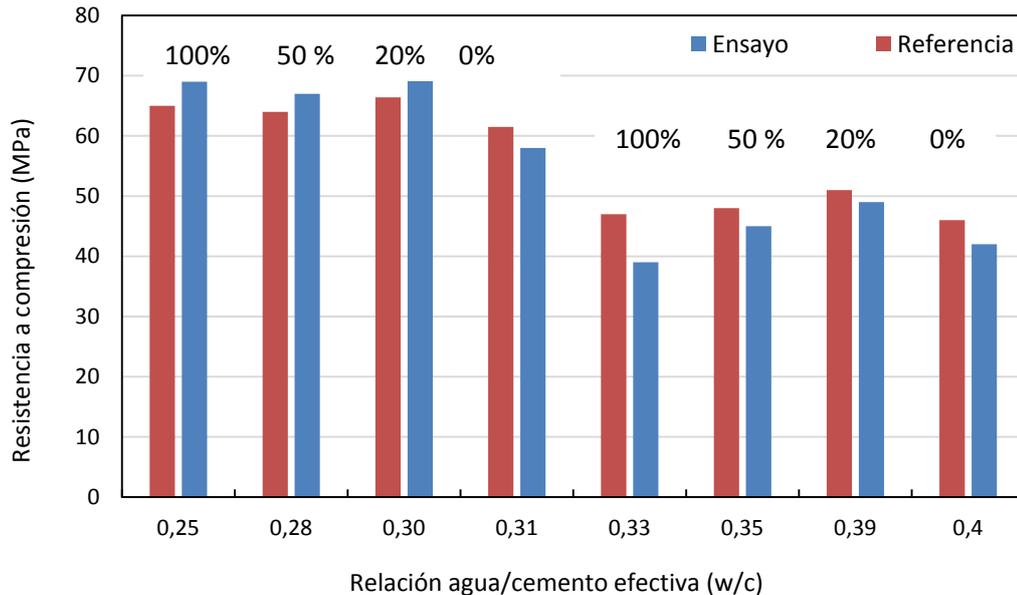


Fig. 180 Resultados resistencia a compresión de las probetas después del ensayo de heladicidad en comparación con probetas de referencia, en función de la relación agua/cemento efectiva.

Las resistencias por lo tanto se ven mejoradas frente a las probetas de referencia en valores entre un 5% y un 7% de mayor valor para la sustitución mayor. Todo esto queda reflejado en que las curvas tienden a confluir a medida que disminuye la relación agua/cemento efectiva, dado el buen comportamiento de la pasta que tiende a proteger al árido reciclado. Existen estudios que reflejan este mejor comportamiento^{477 478}.

A raíz de los resultados, debemos considerar varios factores relacionados con el comportamiento de los ciclos hielo-deshielo que se han aplicado a las dosificaciones

⁴⁷⁷ Foster, S. (1986). "Recyclate concrete aggregate." Concrete International: 34-40.

⁴⁷⁸ Mulheron, M. and Omahony (1988). The durability of recycled aggregate. Demolition and Reuse of concrete masonry RILEM Symposium 2: 633-642.

ya especificadas y sin la inclusión de aditivos aireantes que mejoren el comportamiento, tal y como se recogen en el estudio del Al-Assadi⁴⁷⁹.

No es posible relacionar el factor de durabilidad que expone el ASTM 666, y que estudian otros autores³⁶⁴, a pesar de que se dispone de resultados de ensayos de ultrasonidos, pero solamente del inicio y fin del ensayo.

4.2.4.3. Ensayo de abrasión

La resistencia a la abrasión no es una característica fundamental para los hormigones utilizados en prefabricación a no ser que se utilicen piezas prefabricadas sobre soleras o en forjados con su superficie vista, si bien nos pueden dar la orientación de su comportamiento y afección al desgaste en zócalos de paneles prefabricados cuya erosión es más latente por salpiqueo.

En la Fig. 181 se muestran los resultados de las huellas producidas en las probetas catalogadas como HR-45 para las sustituciones 0%, 20%, 50% y 100%



Fig. 181 Resultado de la huella producida en las probetas de hormigón según el grado de sustitución por AR.

En este apartado se compara la influencia en la sustitución de AR en el hormigón. En la Tabla 82 se muestran los resultados del ensayo de abrasión expresándose éstos la medición de la huella en mm.

Tabla 82 Resultados ensayo abrasión.

Ensayo abrasión	Probetas curadas en cámara edad 28 días		Valores de huella (mm)	
TIPO HR	Media huella (mm)	Tipo	Media huella (mm)	
HR-30-0% (Control)	19,32	HR-45-0% (Control)	19,22	
HR-30-20%	19,51	HR-45-20%	19,33	
HR-30-50%	19,95	HR-45-50%	19,92	
HR-30-100%	20,58	HR-45-100%	19,97	

⁴⁷⁹ Al-Assadi, G., Casati, M. J., Fernández, J. and Gálvez, J. C. (2011). "Effect of the curing conditions of concrete on the behaviour under freeze-thaw cycles." *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 34(7): 461-469.

La relación entre la huella y su relación agua/cemento efectiva se muestra en Fig. 182. Si bien no se han encontrado estudios que determinen el ajuste de las curvas, se ha adoptado a una recta ascendente de ecuación $y=Ax+B$ cuyos valores A y B se especifican en la Fig. 182 referenciada.

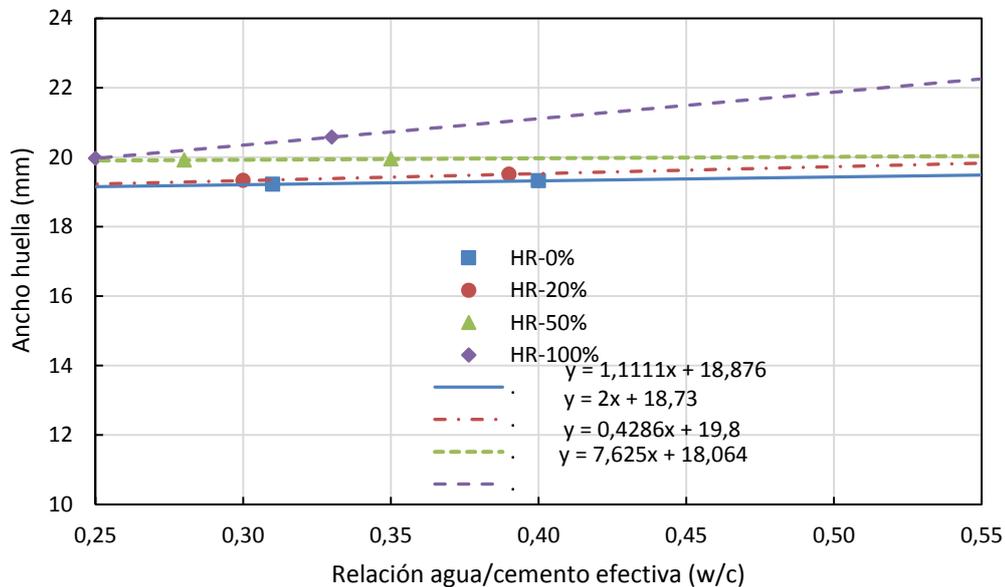


Fig. 182 Resultados de las huellas medias en relación al agua/cemento efectiva.

Se observa que los valores menores de huella, denotan una mayor resistencia a la abrasión, y se aprecian en los hormigones de control, de menor grado de sustitución y de menor relación agua/cemento efectiva. Sí se puede concluir una mayor tendencia para el grado de sustitución máximo. Para la sustitución del 100% de árido grueso, sí se aprecia un cierto incremento significativo en la profundidad de la huella entre el hormigón de resistencia HR-30 y el hormigón catalogado como HR-45 de aproximadamente un 3% y de un 5 % respecto el hormigón de referencia, valores por debajo de los obtenidos por otros autores^{480 481}.

La tendencia de los resultados, podemos concluir, converge en valores de relación agua/cemento bajos, próximos a 0,25, lo cual revela el efecto de la mayor resistencia a la abrasión producido por la pasta de mayor calidad.

La clasificación comparativa atendiendo a las baldosas de hormigón para uso exterior, se describe en la Tabla 83, resultando que los valores obtenidos en el

⁴⁸⁰ Dhir, R. K., Limbachiya, M. C. and Leelawat, T. (1999). "Suitability of recycled concrete aggregate for use in BS 5328 designated mixes." Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings **134**(3): 257-274.

⁴⁸¹ De Brito, J. (2010). "Abrasion resistance of concrete made with recycled aggregates." Construction and Building Material **3**(1): 58-64, *ibid*.

ensayo fueron favorables y por debajo de los máximos requeridos, para exteriores, del desgaste por abrasión. La especificación de la Norma EN-1217339:2012 expone que cuando se requiera durabilidad al uso, se recomienda que las baldosas de hormigón cumplan como mínimo con el requisito de la clase 2 marcado G (huella menor de 26 mm) definido en apartado 5.3.4.2 de la Norma UNE-EN-1339.

Tabla 83 Requisitos normativos referentes a la durabilidad de uso en exteriores.

Requisitos	Baldosa hormigón UNE-EN-127339 ⁴⁸² y UNE-1339 ⁴⁸³			Loseta de hormigón UNE-127-023
	Clase	Marcado	Valor individual	
Desgaste por abrasión	2	G	< 26 mm	Valor individual < 21 mm
	3	H	< 23 mm	

Según la EHE para todo hormigón que vaya a estar sometido a clase de exposición **E** se tiene que cumplir una serie de requisitos para conseguir dicha resistencia a la abrasión:

Tabla 84 Requisitos según EHE-08 para un hormigón con ambiente E.

Requisitos	mínimo	HR-30	HR-45
Contenido mínimo de cemento (kg/m ³)	320-300	250	320
Relación agua/cemento máx.	0,5	0,45	0,35
Resistencia mínima hormigón (MPa)	30	30	45
Árido fino cuarzo o similar	Cuarzo o similar	silíceo	silíceo
Árido Grueso coeficiente Los Ángeles (%)	30	37(*)	37(*)

(*) Para sustituciones de 100%

4.2.4.4. Envejecimiento acelerado por choque térmico

Todos los hormigones colocados en el exterior están sometidos a ciclos continuos de humedad-sequedad debidos a los cambios climatológicos. Un elemento prefabricado (pilar, panel de fachada) a pleno sol, un día de verano, puede alcanzar los 50°C de temperatura; una tormenta de verano llega a mojar el hormigón y puede hacer que su temperatura baje bruscamente a 30° C o 40° C en la superficie expuesta al agua. Estas bruscas variaciones de temperatura crean tensiones en el interior del hormigón, y especialmente en zonas muy próximas del mismo, debido a la diferencia de temperatura entre la cara expuesta y la cara interior.

⁴⁸² EN-127339 (2007). Propiedades y condiciones de suministro y recepción de baldosas de hormigón.

⁴⁸³ UNE-EN-1339 (2003). Baldosas de hormigón: Especificaciones y métodos de ensayo.

Esto influye en la vida útil del elemento prefabricado, en nuestro caso, por lo que el ensayo cuyos resultados se exponen a continuación, mide la resistencia al envejecimiento por choque térmico.

La inspección visual efectuada después del total de los ciclos efectuados, no mostró signos de deterioro, ni pérdida de material apreciable.

La variación de la masa de las probetas, Tabla 85, no muestra modificaciones reseñables, incluso cierta ganancia de peso producida seguramente por algo de agua retenida en sus poros, por lo que se puede concluir que no se ha producido deterioro en las muestras por alteración en la capa superficial del hormigón.

Tabla 85 Envejecimiento acelerado por choque térmico: Variación de masa Pn.

TIPO HR	Pn (g) Antes	Pn (g) Después	Δ peso (%)	
HR-30 0% (Control)	2433,0	2438,0	+0,21	↑
HR-30 20%	2325,0	2329,0	+0,17	↑
HR-30 50%	2399,5	2401,8	+0,10	↑
HR-30 100%	2323,9	2338,2	+0,61	↑
HR-45-0% (Control)	2427,0	2433,0	+0,25	↑
HR-45-20%	2390,0	2395,0	+0,21	↑
HR-45-50%	2404,6	2409,9	+0,22	↑
HR-45-100%	2372,3	2378,8	+0,27	↑

Los resultados de las resistencias obtenidas en función de su relación agua/cemento efectiva efectuadas antes y después del ensayo de choque térmico se muestran en el gráfico de la Fig. 183.

Se observa un leve aumento de la resistencia en las sustituciones del hormigón de control, de 50% y 100% sin poder obtener una tendencia clara.

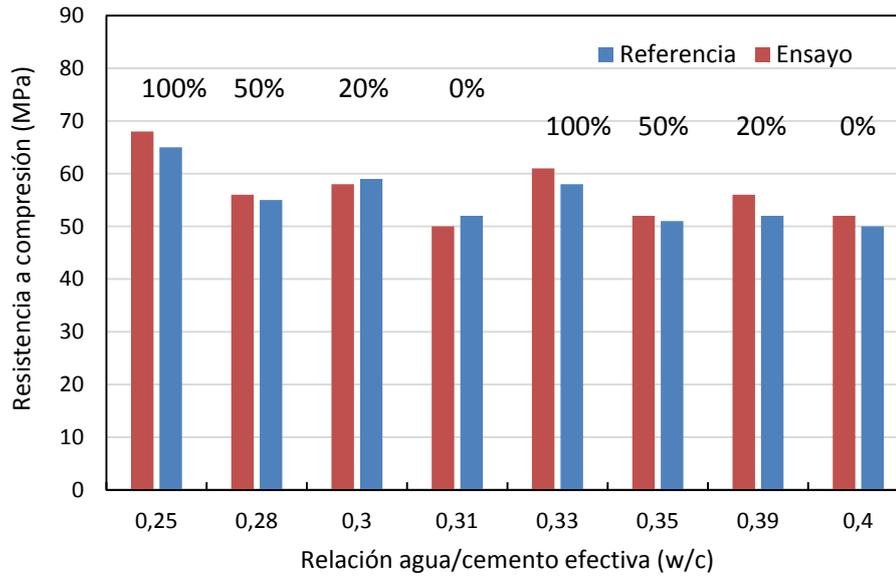


Fig. 183 Comparativo de los resultados de resistencia después ciclos choque térmico comparado con las probetas de referencia en función de su relación agua/cemento efectiva.

4.2.5. Procesos químicos que afectan a la durabilidad del hormigón.

4.2.5.1. Carbonatación natural

En las Fig. 184 y Fig. 185 se muestran para la el hormigón HR-30 y HR-45, el resultado después de rociar con fenolftaleína, de la coloración rosa en toda la superficie fracturada aplicada. La zona carbonatada, es decir, donde la penetración de CO_2 haya afectado al perímetro exterior con color hormigón, es inexistente.

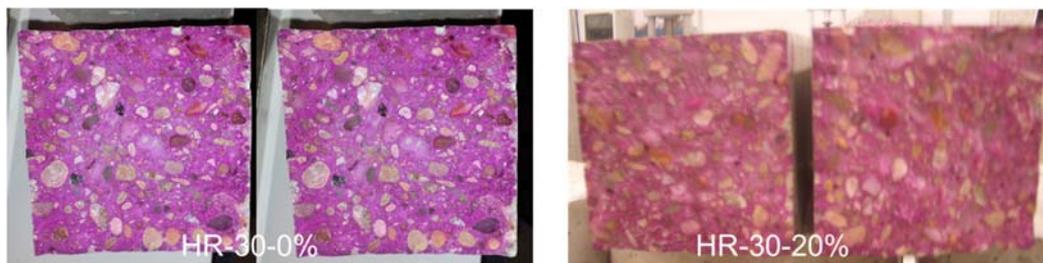


Fig. 184 Carbonatación natural probetas ensayo hormigón HR-30-0% y HR-30-20%.

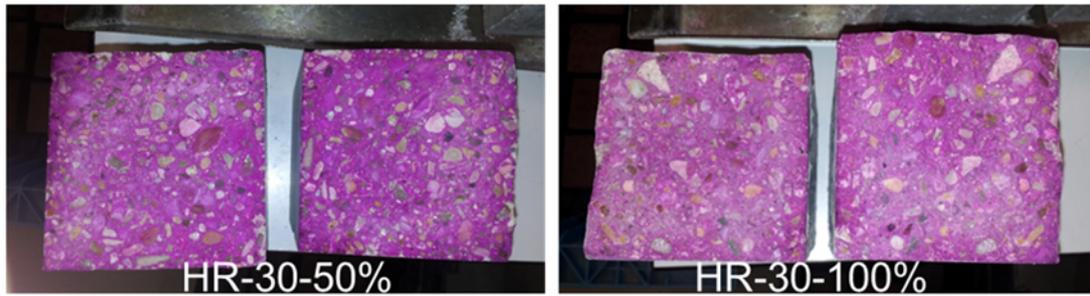


Fig. 185 Carbonatación natural probetas ensayo hormigón HR-30-50% y HR-30-100%.

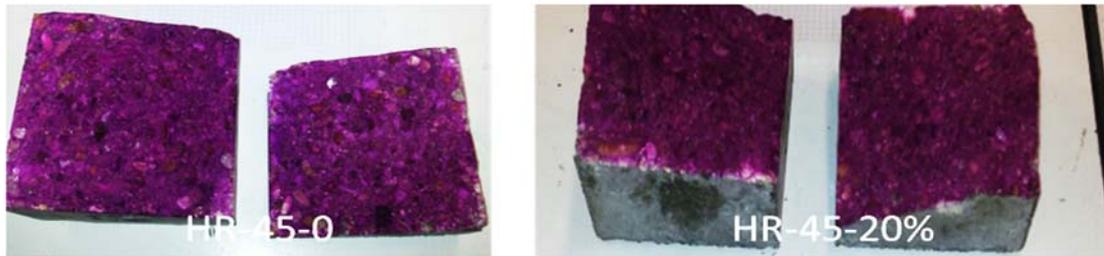


Fig. 186 Carbonatación natural probetas ensayo hormigón HR-45-0% y HR-45-20%.



Fig. 187 Carbonatación natural probetas ensayo hormigón HR-45-50% y HR-45-100%.

Para el periodo de un año la profundidad de carbonatación es prácticamente nula en todos los casos salvo algún pequeño entrante de poca relevancia y sin ninguna tendencia.

4.2.5.2. Carbonatación acelerada

En las Fig. 188 y Fig. 189 se muestran el resultado de aplicar la fenolftaleína sobre las superficies fracturadas de las probetas para los hormigones catalogados como HR-30 y HR-45 y para cada de las sustituciones 0%, 20%, 50% y 100% tras el ensayo de carbonatación acelerada.

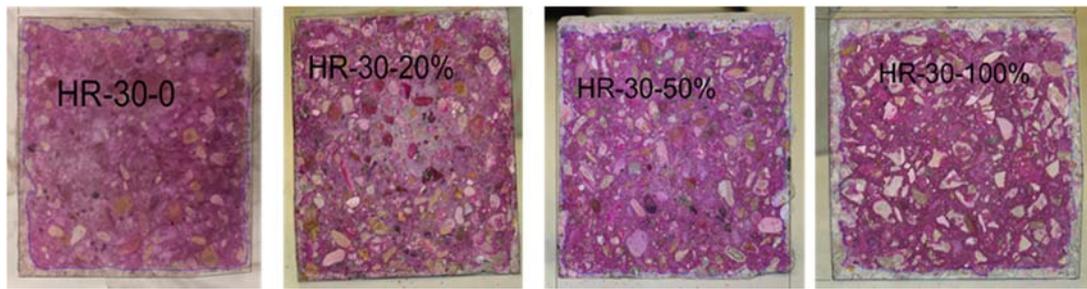


Fig. 188 Resultados de profundidad de carbonatación en el HR-30.



Fig. 189 Resultados de profundidad carbonatación en el HR-45.

El mecanismo de intrusión del CO_2 reacciona con el hidróxido cálcico del hormigón, transformándose en carbonato cálcico, disminuyendo el pH y aumentando ligeramente la resistencia y peso.

Los resultados de profundidad de carbonatación se muestran en la Tabla 86.

Tabla 86 Profundidad media de carbonatación HR-30 y HR-45.

TIPO HR	Media (mm)
HR-30-0% (Control)	3,57
HR-30-20%	3,35
HR-30-50%	3,88
HR-30-100%	5,58
HR-45-0% (Control)	3,10
HR-45-20%	3,05
HR-45-50%	3,67
HR-45-100%	4,62

La profundidad de carbonatación en función de su relación agua/cemento efectiva muestra generalmente una curva exponencial, a raíz de los estudios consultados⁴⁸⁴, de ecuación (79):

⁴⁸⁴ Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A. and Alaejos, P. (2013). "Durability of recycled aggregate concrete." *Construcción and Building Material* **40**: 1054-1065.

$$y = Ae^{Bx} \quad (79)$$

Y cuyos parámetros A y B se muestran en la Fig. 190.

Existe un incremento de la profundidad media de carbonatación entre el hormigón de control y el hormigón con sustitución de un 100%. Dicho incremento es del 32% en el HR-45 y del 36% en el hormigón HR-30. Esto puede venir influenciado por la mayor porosidad accesible debido a la mayor cantidad de mortero adherido en el hormigón con sustitución de un 100% de AR.

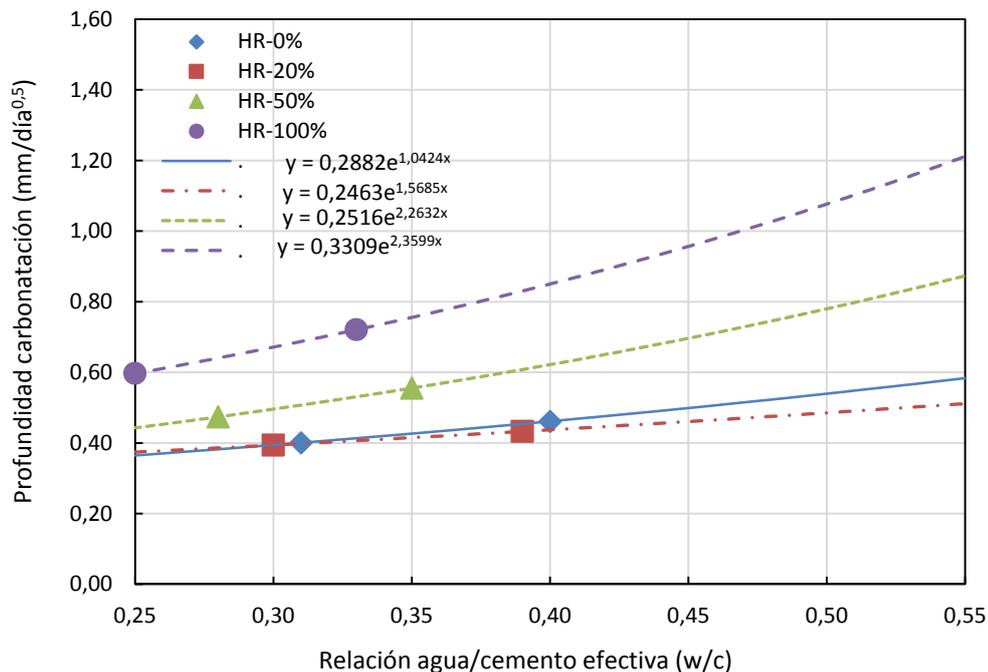


Fig. 190 Resultado y tendencia de la profundidad de carbonatación en función relación agua/cemento efectiva.

Se observa un aumento de la profundidad de carbonatación a medida que aumenta la relación agua/cemento y grado de sustitución.

La instrucción española EHE-08⁴⁸⁵ establece que para un ambiente IIb, el valor máximo del índice de carbonatación es de 1 mm/día^{0,5}. En la gráfica descrita se obtiene que para el hormigón de control y los hormigones con sustituciones de hasta un 50%, el valor de carbonatación está por debajo de dicho límite. Para el hormigón con sustitución de 100%, si se desea obtener el límite de 1 mm/día^{0,5}, para el ambiente IIb, se debe recurrir a una relación agua/cemento de 0,45.

⁴⁸⁵ EHE-08 (2008). Instrucción Española del Hormigón Estructural. Madrid, Ministerio de Fomento.

La confluencia mayor de las curvas para relaciones agua/cemento bajas revela la influencia que la pasta nueva tiene sobre el árido reciclado, más poroso, aunque las profundidades de carbonatación tienden a igualarse.

En la Fig. 191 se especifican los resultados de los impulsos ultrasónicos llevados a cabo antes y después del ensayo. También la tendencia general revela una leve ganancia de resistencia.

Los resultados de diferencia de pesos antes y después del ensayo mostraron una ganancia del mismo entre un 0,03% y un 0,15% siendo de pequeña magnitud, lo que se encuentra acorde con el resto de estudios que contrastan la pérdida o ganancia de resistencia.

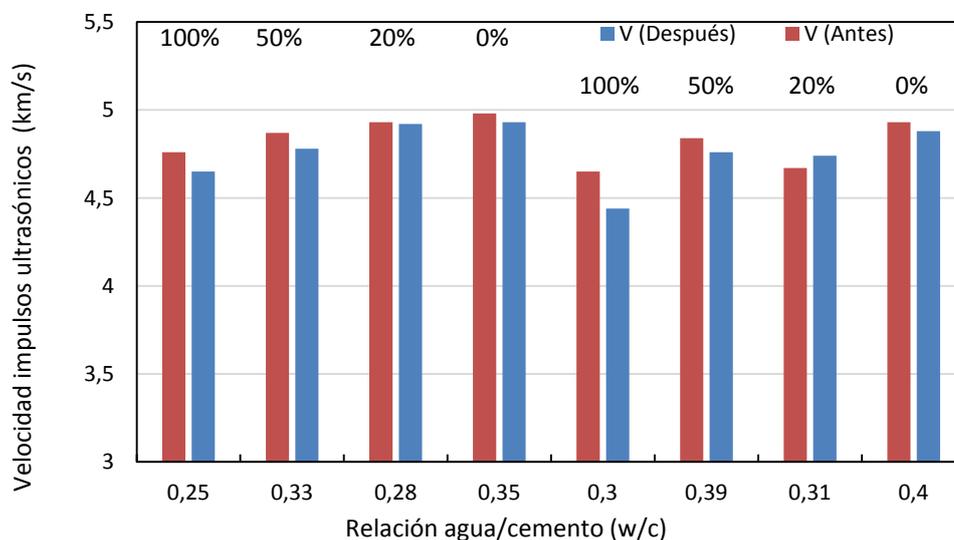


Fig. 191 Gráfica de impulsos ultrasónicos antes y después del ensayo en función de la relación agua/cemento efectiva.

En la Fig. 192 se muestra el comparativo entre diferentes estudios y los resultados obtenidos.

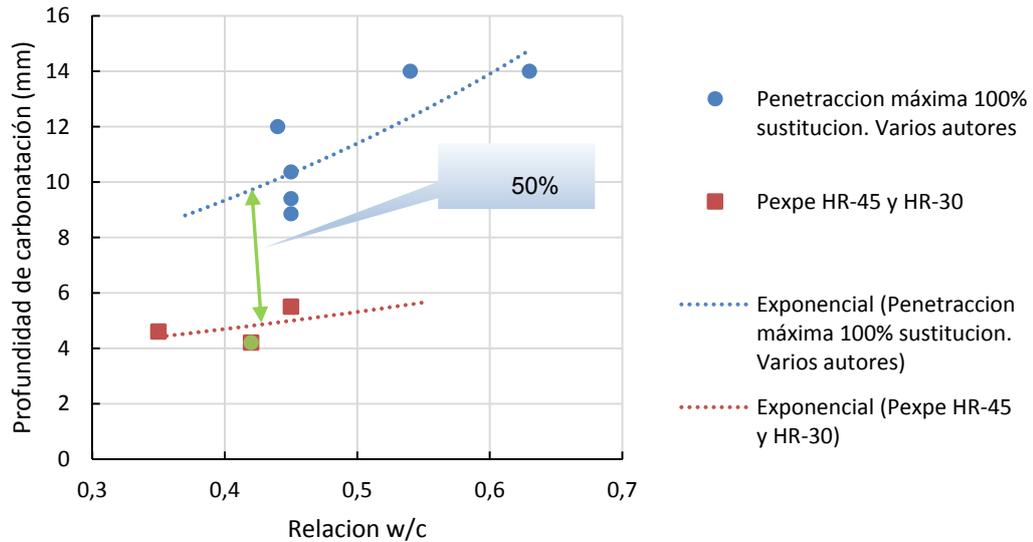


Fig. 192 Relación entre profundidad de carbonatación y relación w/c en estado arte^{357 358 486 487}, así como disminución por empleo de superfluidificantes.

Finalmente, los resultados experimentales del presente trabajo evidencian un excelente comportamiento frente a la carbonatación, presentando valores sensiblemente inferiores a los obtenidos por los mencionados autores. Las diferencias con respecto a aquellos son del orden del 50%, esto es debido al empleo de superfluidificantes, conclusión también obtenida por Soares⁴⁸⁸ en un estudio con áridos procedentes de elementos prefabricados.

Intercalando los resultados de hormigones con empleo de superfluidificantes, con el estudio experimental realizado o con otros estudios, (Soares⁴⁸⁸), se deduce que la penetración por carbonatación disminuye en un 50% de media.

Atendiendo a otros estudios (Barra⁴⁸⁹), afirma que en el proceso de carbonatación en hormigones reciclados depende tanto de la permeabilidad del mortero nuevo como de la del árido reciclado. En nuestro caso en el que el árido reciclado presenta una estructura porosa semejante, equivalente o con menos poros, la penetración del CO₂ se producirá normalmente a través del mortero nuevo presentando un comportamiento similar al del hormigón patrón (Fig. 193).

⁴⁸⁶ Limbachiya, M., Meddah, M. S. and Ouchagour, Y. (2012). "Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete." *Construction and Building Materials* **27**(1): 439-449.

⁴⁸⁷ Kou, S. C. and Poon, C. S. (2012). "Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate." *Construction and Building Material* **35**: 69-76.

⁴⁸⁸ Soares, D., Brito, J., Ferreira, J. and Pacheco, J. (2014). "Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance." *Ibid.* **71**: 263-272.

⁴⁸⁹ Barra, M. (1996). Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón estructural. Departamento de construcciones. , Universidad Politécnica Cataluña.

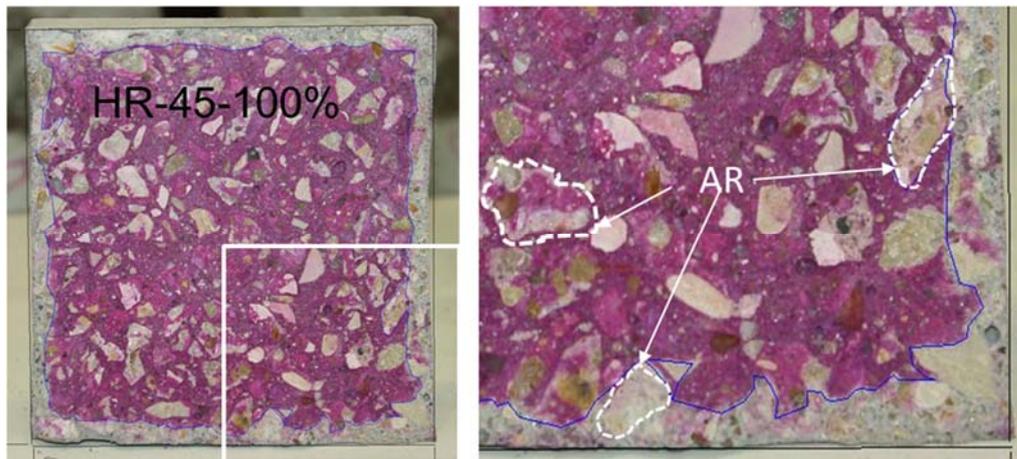


Fig. 193 Exposición de probeta HR-45 con sustitución de 100% en el que se puede apreciar ampliado la posible influencia de la nueva pasta y la posibilidad de que algún árido que no muestra el color rosáceo.

4.2.5.2.1. Estimación de la edad de inicio de carbonatación según diversos modelos

Para todas las estimaciones se ha tomado un recubrimiento de 20 mm.

Atendiendo a ley de Fick y para el cálculo de iniciación real de la corrosión de estos hormigones se ha realizado una interpolación de las concentraciones de CO_2 entre el ensayo y el ambiente resultante según indica Ocampo⁴⁹⁰.

La estimación para los diferentes hormigones ensayados con los parámetros aplicados de las tablas⁴⁹¹ tomando f_{cm} a los valores resultados de los ensayo de las probetas a compresión, para un ambiente expuesto a la lluvia, con un valor de $>4,5\%$ de aire ocluido, y para un cemento portland Tipo I.

La estimación según modelo Papadakis^{492 493} se determina a partir de una densidad de cemento de $3,0 \text{ g/cm}^3$, densidad de los áridos $\rho_a=2,55 \text{ g/cm}^3$ para el árido natural y $\rho_{ar}=2,35 \text{ g/cm}^3$ para el AR, volumen de $\text{CO}_2=0,00035 \text{ cm}^3$, y una humedad del 60%.

La estimación según modelo de Parrott⁴⁹⁴ y los métodos propuestos por diferentes autores se basan en el coeficiente de difusión de CO_2 , mientras que Parrot formula

⁴⁹⁰Ocampo, P., Vuanello, O., Ortuzar, R. and Seminara (2010). Estudio de la carbonatación acelerada en probetas de hormigón armado. VI congreso internacional sobre patología y recuperación de estructuras. Córdoba.

⁴⁹¹ Tablas Anejo 9 EHE-08

⁴⁹² Papadakis, V., Vayena, C. and Fardis, H. (1992). "Fundamental Modeling and Experimental Factors and Cement-lime Mortar Coating on Concrete Carbonation." *Materials and Structures* **25**: 293-305.

⁴⁹³ Papadakis, V. G., Fardis, M. N. and Vayenas, C. G. (1992). "Hydration and carbonation of pozzolanic cements." *Aci Materials Journal* **89**(2): 119-130.

⁴⁹⁴ Parrot, L. (1994). Design of avoiding damage due to carbonation-induced corrosion, in CANMET/ACI Conference on durability of concrete. Nice, France.

su modelo en función de la permeabilidad al aire. Tiene además la ventaja de poder variar el valor de n según la humedad relativa e introduce de forma directa la componente alcalina de la mezcla.

A continuación, se aplica la fórmula al hormigón experimental HR-45, teniendo en cuenta que se adopta n=0,5 (HR=60%) y que el componente de CaO se encuentra en la Tabla 42 del Capítulo 3 de la tesis.

Contenido CaO: 63,89% de 320: 204 kg

Sustituyendo valores en la formula adjuntada en el Capítulo 3 (80) y (81):

$$t^2 = \frac{0,025 \cdot 204^{0,5}}{64 \cdot 10^{(-16,0,4)}} = \frac{0,025 \times 14,28 \cdot 10^{6,4}}{64} = 14,011 \quad (80)$$

$$t = \sqrt{14,011} = 118 \text{ años} \quad (81)$$

Finalmente se determina el valor de t para el hormigón experimental HR-30 (82) y (83):

$$t^2 = \frac{0,025 \cdot 160^{0,5}}{64 \cdot 10^{(-16,0,4)}} = \frac{0,025 \cdot 12,64 \cdot 10^{6,4}}{64} = 12,402 \quad (82)$$

$$t = \sqrt{12,402} = 111 \text{ años} \quad (83)$$

Los resultados de los modelos antes referenciados se especifican en la Fig. 194 siendo el modelo de Parrot en el que más se ajusta a la ley de Fick.

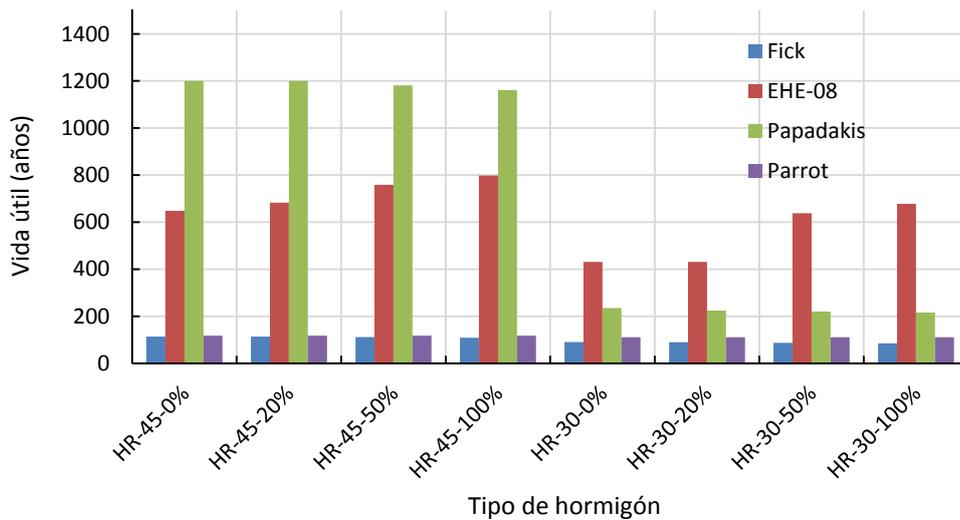


Fig. 194 Estimación vida útil según diferentes modelos.

4.2.5.3. Ataque por ácidos. Ensayos de Kesterlinch

Como complemento a los ensayos de durabilidad se analiza el comportamiento del hormigón frente al dióxido de azufre con humedad condensada. El comportamiento del hormigón de recubrimiento frente a las armaduras metálicas o uniones prefabricadas puede resultar de interés.

Este ensayo complementa a los ensayos de envejecimiento por la acción atmosférica, en este caso las atmosferas ácidas producidas por los gases de las combustiones fósiles (gasolina, gasoil de las calefacciones, etc.).

El SO₂ puede llegar a reaccionar con la cal libre de la matriz cementicia, si al reaccionar con el vapor de agua degenera en ácido sulfúrico.

La inspección visual realizada no denota ningún signo relevante de degradación después del ensayo, lo que indica que la atmosfera sulfurosa no afecta ni al cemento, ni al resto de componentes del hormigón. No se ha apreciado ningún defecto significativo de degradación después del ensayo.

En las Tabla 87 y Tabla 88 se muestran los resultados obtenidos de las mediciones de peso antes y después del ensayo.

Tabla 87 Resultados del ensayo de Kesternich HR-30.

Ensayo Kesternich diferencia de peso seco % HR-30. Probetas curado normalizado							
Análisis							
Tipo	P _{S1} (g)	P _{S2} (g)	Media	P _{S1} (g)	P _{S2} (g)	Media (g)	Δ%
HR-30-0 (Control)	2463,7	2410	2436,9	2466,2	2411,	2438,9	+0,08 ↑
HR-30-20%	2410,2	2413,4	2411,8	2415,3	2415,	2415,4	+0,14 ↑
HR-30-50%	2428,5	2461,3	2444,9	2427,3	2467,	2447,3	+0,09 ↑
HR-30-100%	2377,5	2325,6	2351,6	2383,1	2329,	2356,1	+0,19 ↑

Tabla 88 Resultados del ensayo de Kesternich para HR-45.

Ensayo Kesternich diferencia de peso seco % HR-45. Probetas curado normalizado							
Análisis	ÁNTES			DESPUÉS			
	Tipo	P _{S1} (g)	P _{S2} (g)	Media	P _{S1} (g)	P _{S2} (g)	Media (g)
HR-45-0 (Control)	2433,5	2442,8	2438,2	2438,5	2445,2	2441,9	+0,15 ↑
HR-45-20%	2405,1	2450,7	2427,9	2407,1	2451,7	2429,4	+0,06 ↑
HR-45-50%	2428,5	2427,6	2428,1	2435,5	2434,5	2435,0	+0,28 ↑
HR-45-100%	2377,6	2353,9	2365,8	2384,9	2358,7	2371,8	+0,25 ↑

En todos los casos se aprecia un pequeño incremento de peso debido seguramente a la precipitación de sulfato producida por la atmosfera de SO_3 .

En la Fig. 195 se muestran los resultados de los valores de resistencia mecánicos a compresión después del ensayo y en comparación con las probetas de referencia conservadas.

Comparativamente se observa que el ensayo de resistencia supone un aumento de resistencia excepto para la sustitución del 100% en el HR-45. En la gráfica se aprecia un aumento de resistencia en las probetas ensayadas en atmosfera de SO_3 respecto de las probetas de referencia, excepto para la sustitución del 20%, si bien las diferencias son pequeñas.

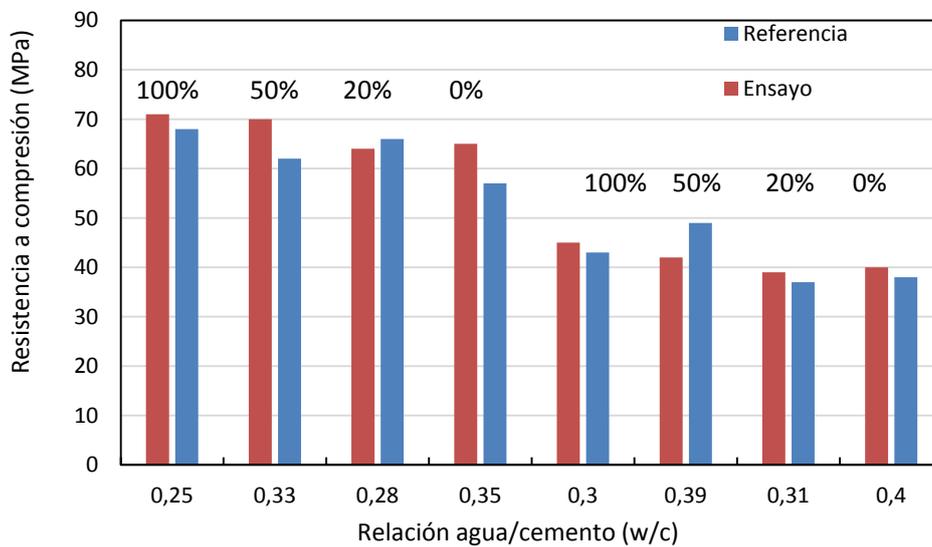


Fig. 195 Resultados del ensayo de rotura a compresión de las probetas ensayadas con las de referencia misma edad conservadas en cámara.

Puede concluirse que las resistencias no se ven alteradas en este ensayo de envejecimiento con atmosfera agresiva SO_3 .

En la Fig. 196 se procede a analizar cualitativamente por comparación entre la probeta de control y la del hormigón con 100% de sustitución, para comprobar el grado de incidencia de la posible precipitación de sulfatos en la superficie de la probeta. Esto se realiza tomando dos muestras superficiales HR-0% y HR-100% y realizando un ensayo químico similar al realizado en el apartado correspondiente a los ensayos químicos de los áridos reciclados.



Fig. 196 Obtención de muestras superficial para comprobación del ensayo cualitativo de sulfatos.

Una vez realizado el ensayo químico, la deposición de sulfatos es similar para los dos hormigones por lo que la afección es similar entre el hormigón de control y el hormigón con sustitución de 100% de AR.

4.2.5.4. Envejecimiento por inmersión en agua, sulfatos y agua de mar

A continuación, se describen los resultados y análisis de los ensayos de inmersión en agua potable, en agua de mar y en agua con sulfatos tal y como se describieron en la metodología.

4.2.5.4.1. Ciclos de humedad-sequedad con agua potable

Los resultados de pérdida de peso son los siguientes y vienen reflejados en la Fig. 197 para el hormigón catalogado con HR-30 y la Fig. 198 para el hormigón HR-45.

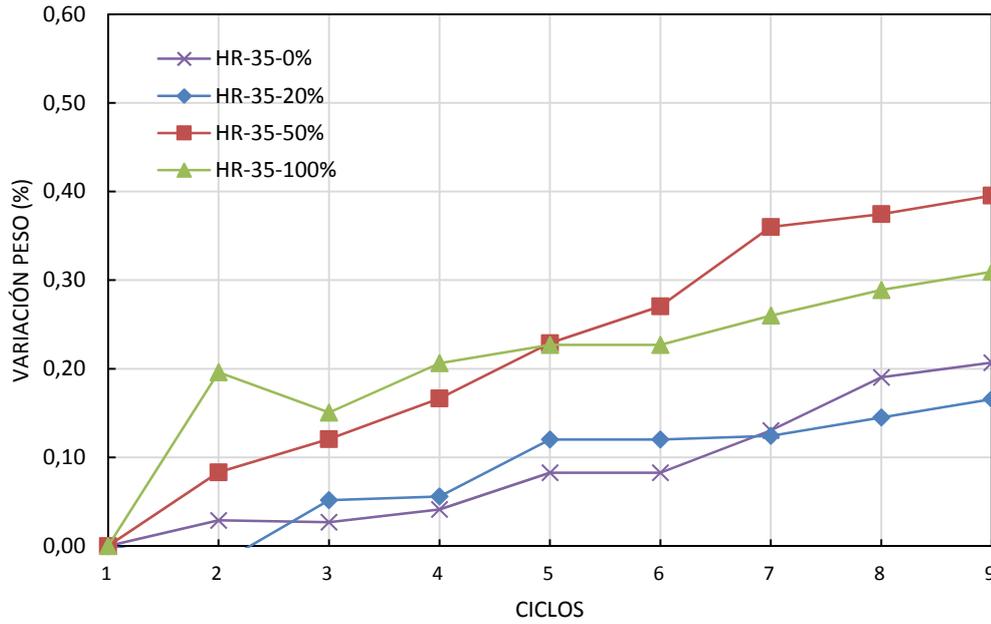


Fig. 197 Resultados ensayo-humedad sequedad HR-30.

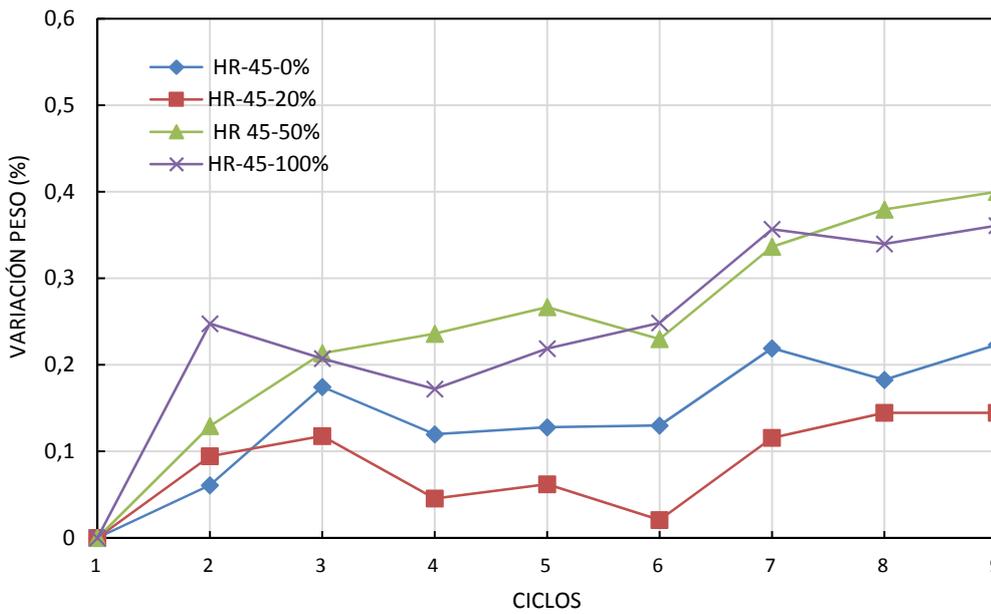


Fig. 198 Resultados ensayo-humedad sequedad HR-45.

En la Fig. 200, muestra los valores de impulsos ultrasónicos efectuado antes y después del ensayo para las probetas ensayadas en función de su relación agua/cemento efectiva.

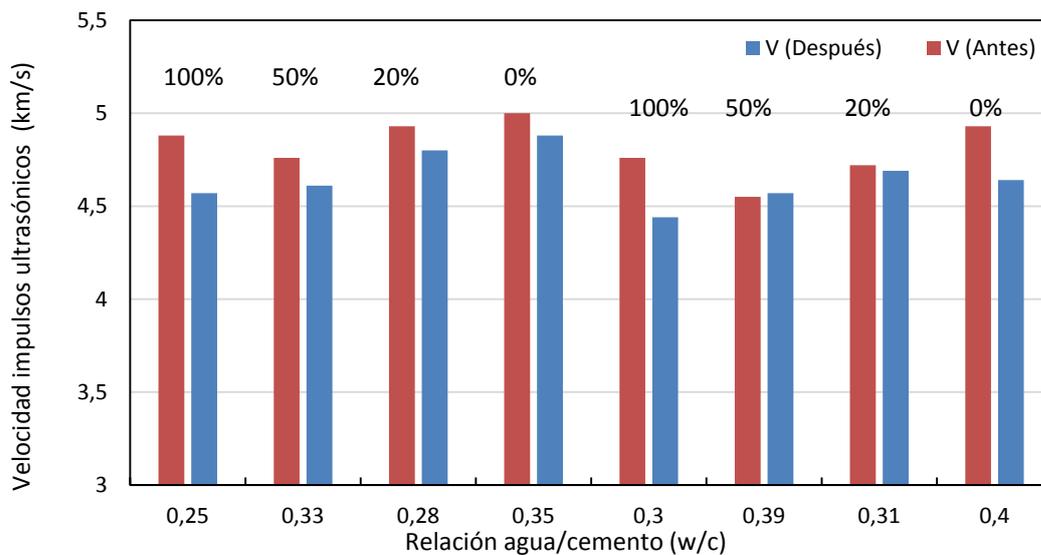


Fig. 199 Gráfico velocidad de impulsos ultrasónicos antes y después del ensayo.

Para el hormigón con resistencia HR-30 el ensayo de ultrasonidos realizado después muestra una menor velocidad, por lo que denota una cierta ganancia de resistencia.

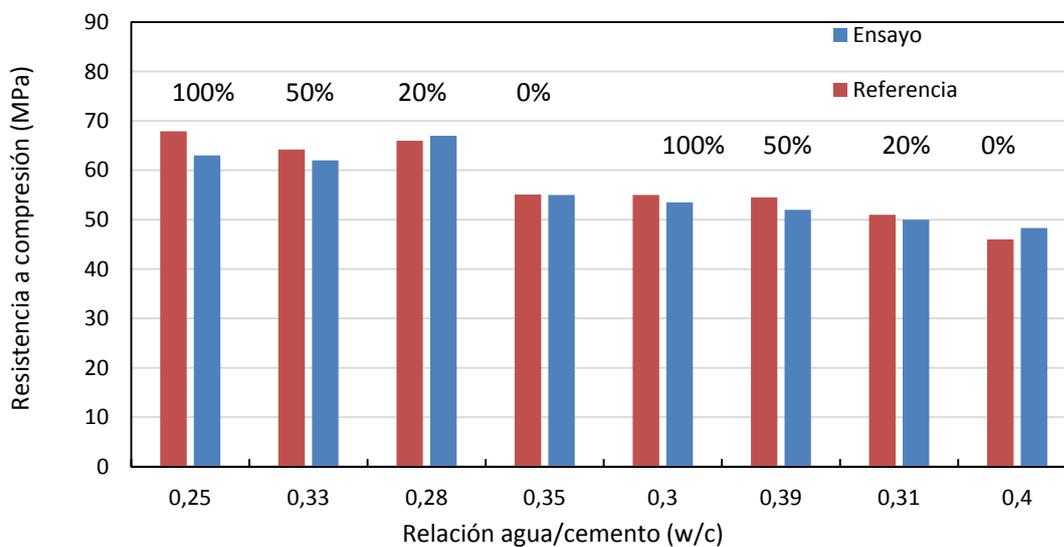


Fig. 200 Resultados del ensayo de resistencia a compresión en las probetas ensayadas en los ciclos con agua de mar comparándolas con las probetas de referencia, en función de la relación agua/cemento efectiva.

Para el hormigón HR-45, en cuanto al ensayo de ultrasonidos, manifiesta la misma tendencia que para el hormigón HR-30, a excepción del hormigón de control que experimenta un leve descenso respecto de la probeta de referencia.

Los valores de las resistencias a compresión obtenidas en las probetas ensayadas y las probetas de referencia se muestran en las Fig. 200 para cada tipo de hormigón.

La valoración inmediata del ensayo tras los sucesivos ciclos de humedad sequedad es que en todos los casos las probetas han ganado peso respecto del inicio. Esta ganancia de peso se debe al propio endurecimiento del hormigón, cuya recristalización supone una colmatación de los poros accesibles. Esto se incrementa en las dosificaciones con mayor sustitución por áridos reciclados, más porosos y con un añadido del mismo efecto. La afección de los sucesivos ciclos de humedad sequedad no denota una pérdida de resistencia, sino, al contrario una ganancia, también influida por la mayor edad de las probetas, pero en cualquier caso y para todas las sustituciones muestran un comportamiento favorable.

4.2.5.4.2. Ciclos de humedad-sequedad por ataque en agua de mar

Los resultados de pérdida-ganancia de peso se expresan en los gráficos de las Fig. 201 y Fig. 202 referidos a peso saturados con superficie seca.

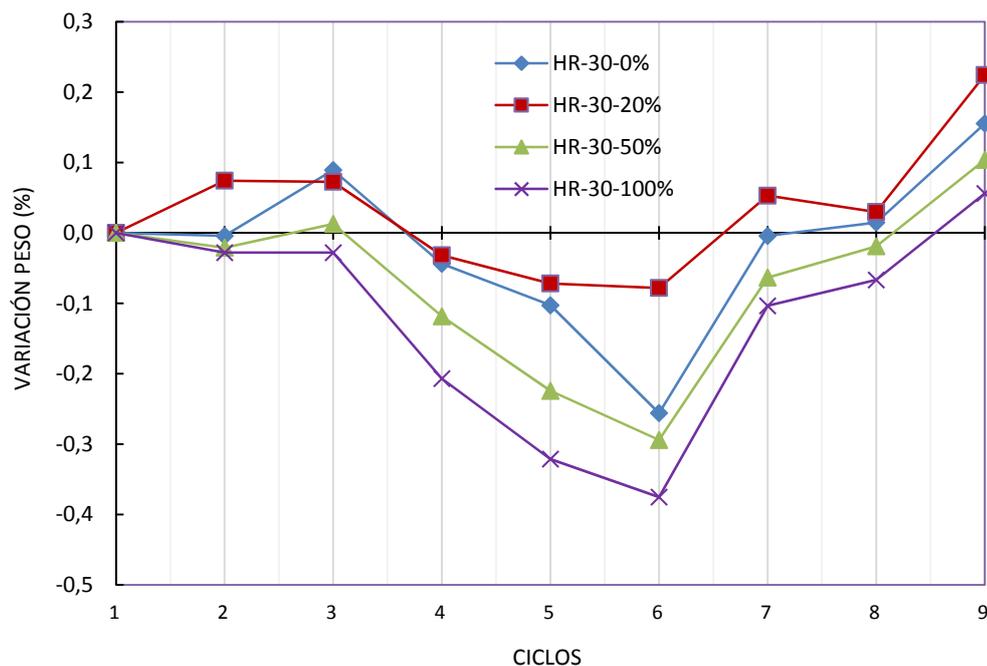


Fig. 201 Resultados ensayo inmersión en agua de mar para HR-30.

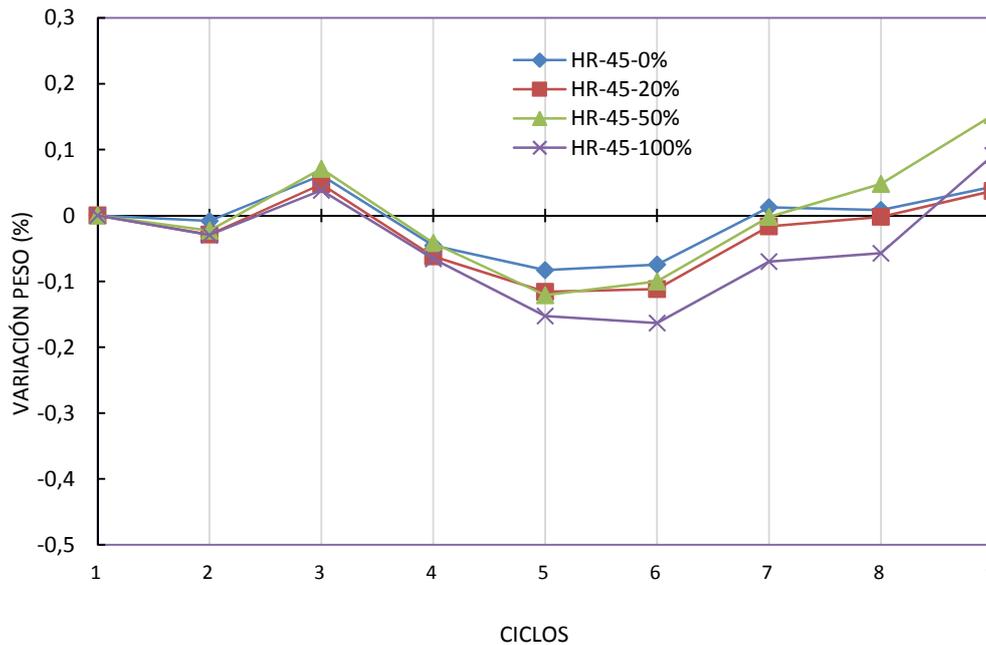


Fig. 202 Resultados ensayo inmersión en agua de mar para el HR-45.

Ciclos 1 a 3: Se aprecia un aumento de peso en las probetas, especialmente en el hormigón HR-45, que puede ser debido a la reacción de hidratación del hormigón.

Ciclos 3 a 7: Se detecta una pérdida notable de peso. La presencia de grandes cantidades de cloruros, presentes en el agua de mar, aumenta la solubilidad de los sulfoaluminatos y del yeso, por tanto son lixiviados por el agua de mar. Por otra parte el ión cloro provoca la formación de cloroaluminatos.

Ciclos 7 a 9: A partir del ciclo 7º se aprecia nuevamente un aumento de peso, seguramente debido a que el agua de mar que contiene sales en abundancia penetra en la red porosa del hormigón y se produce la precipitación de aquellas en el interior de los poros.

Para el hormigón HR-45 la tendencia es la misma que para el hormigón HR-30, de ganancia de resistencia tanto en el ensayo de ultrasonido como en el ensayo de resistencia a compresión, salvo para las sustituciones de 0% y 20%.

El comportamiento del hormigón sumergido en agua marina es muy complejo porque como consecuencia de los procesos químicos resultan varias reacciones simultáneas e interdependientes.

Los procesos químicos básicos se resumen en el esquema de la Fig. 203 y consisten fundamentalmente en que el aluminato tricálcico, formado en la hidratación del cemento en presencia del ión calcio liberado en aquella, forma sulfoaluminato tricálcico (etringita).

Simultáneamente la abundancia de cloruros tiene dos efectos notables, la formación de monocloroaluminato de calcio (sal de Friedel) y el aumento de la solubilidad del yeso y de la etringita que se disuelven en el agua marina. La etringita residual cristaliza bajo una forma no expansiva.

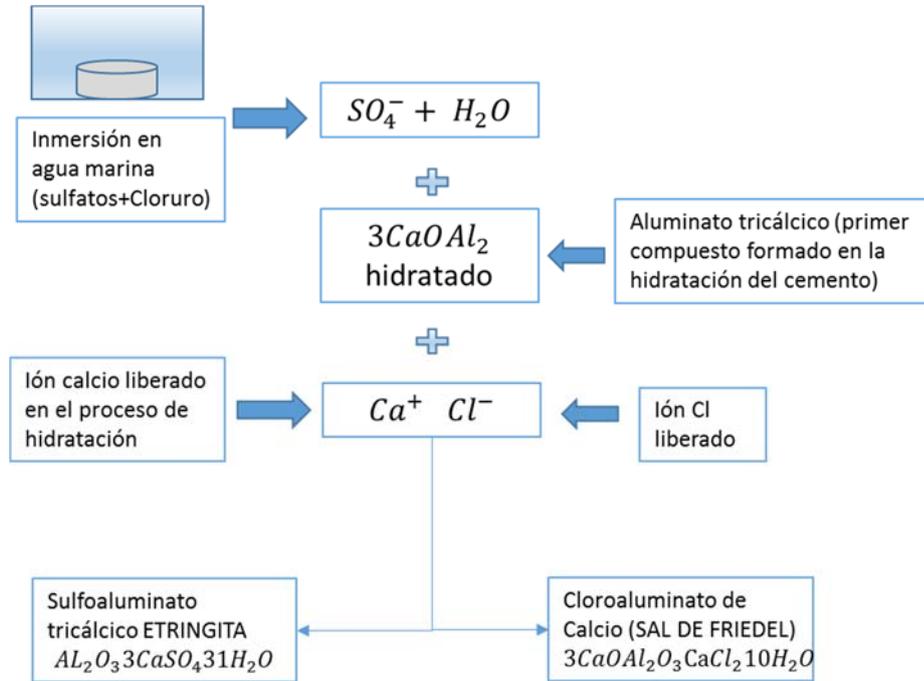


Fig. 203 Esquema de reacciones químicas producidas durante el ensayo.

Los valores de los resultados de la velocidad de los impulsos ultrasónicos antes y después del envejecimiento se muestran en la Fig. 204 y en la Fig. 205.

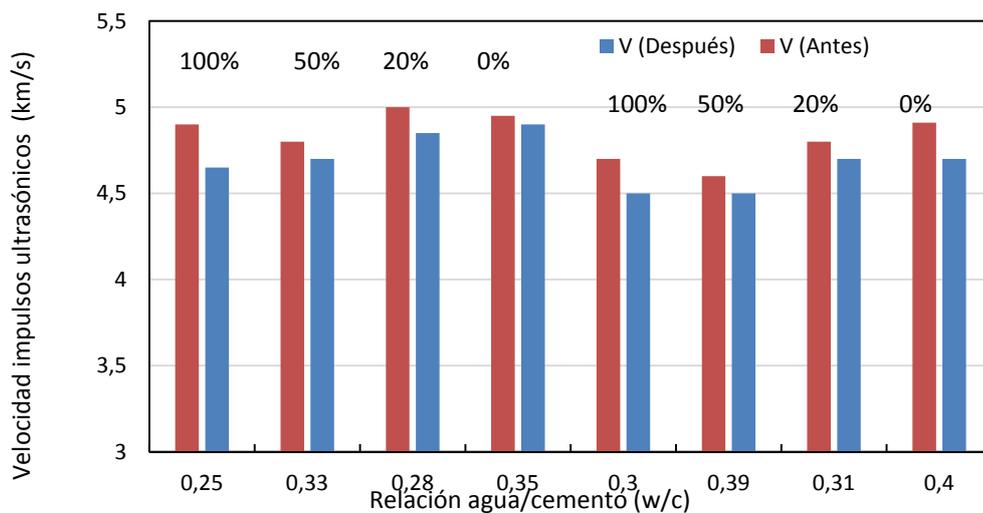


Fig. 204 Resultados velocidad de impulsos ultrasónicos antes y después de los ciclos, en función de la relación agua/cemento efectiva.

Las velocidades de los ultrasonidos son ligeramente más bajas después del ensayo de inmersión por lo que denota cierta tendencia a ganar resistencia.

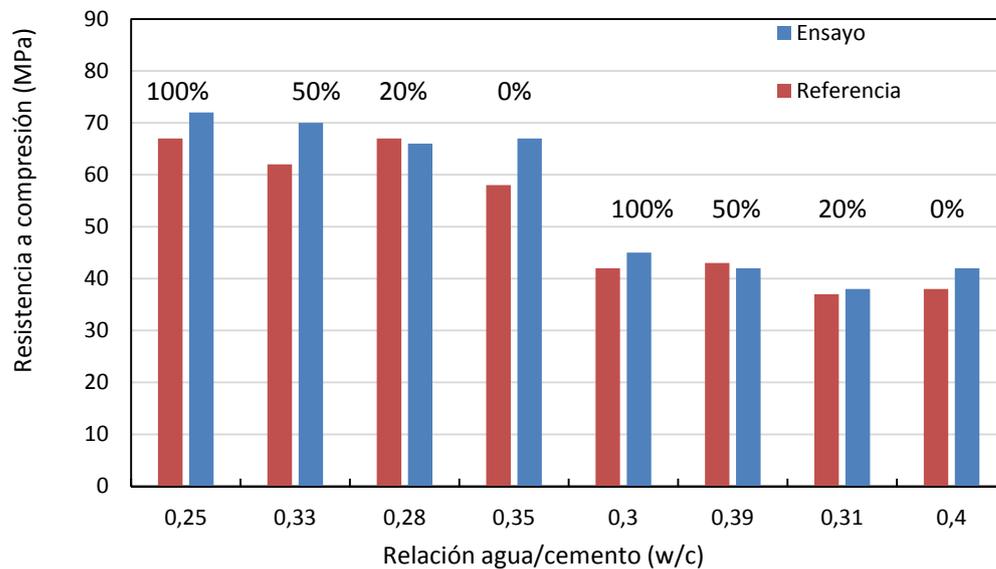


Fig. 205 Resultados del ensayo de resistencia a compresión en las probetas ensayadas después de los ciclos con agua de mar comparándolas con las probetas de referencia, en función de la relación agua/cemento efectiva.

Las resistencias después del ensayo de resistencia a compresión revelan una ganancia de resistencia después del ensayo para todas las sustituciones. Esto puede ser debido a la mayor edad de las probetas y a la influencia de las sales que producen una colmatación de los poros. Se observa también una confluencia de las curvas a medida que aumenta la relación agua/cemento efectiva y así mismo un efecto más desfavorable en los hormigones con mayor grado de sustitución para relaciones agua/cemento más bajas.

Las probetas adquieren un color blanquecino superficial producto de la deposición y cristalización de las sales resultantes del agua de mar lo que justifica su aumento de peso en los últimos ciclos. En la Fig. 206 muestran algunas fotos.



Fig. 206 Apariencia de las probetas una vez finalizados los ciclos humedad sequedad en agua de mar.

4.2.5.4.3. Ciclos de humedad-sequedad con sulfatos

Los resultados de los ensayos de inmersión en solución sulfato se reflejan en las Fig. 207 y Fig. 208, referentes a la variación de peso en % respecto al inicio de los ciclos.

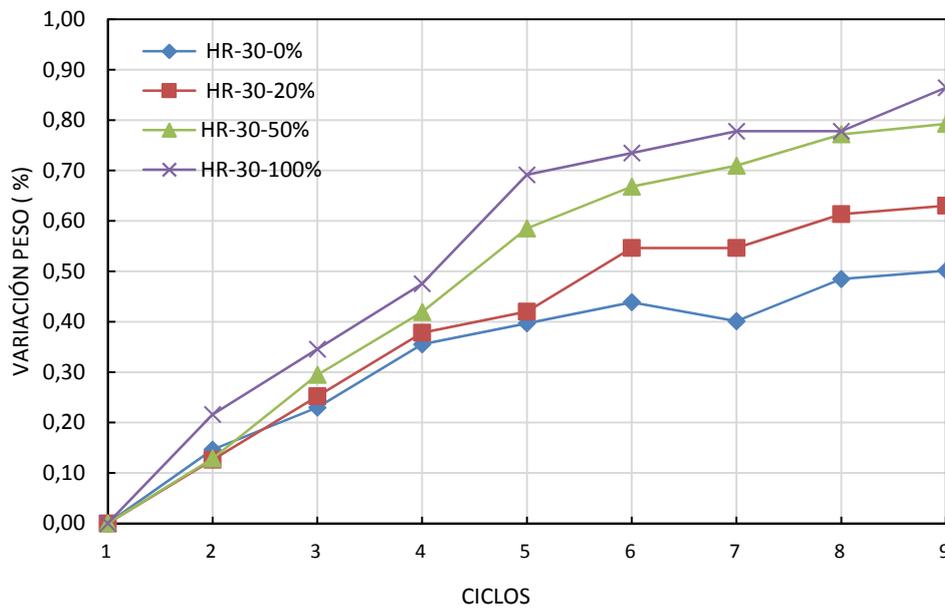


Fig. 207 Gráfico de variación de peso en % para el tipo de hormigón HR-30.

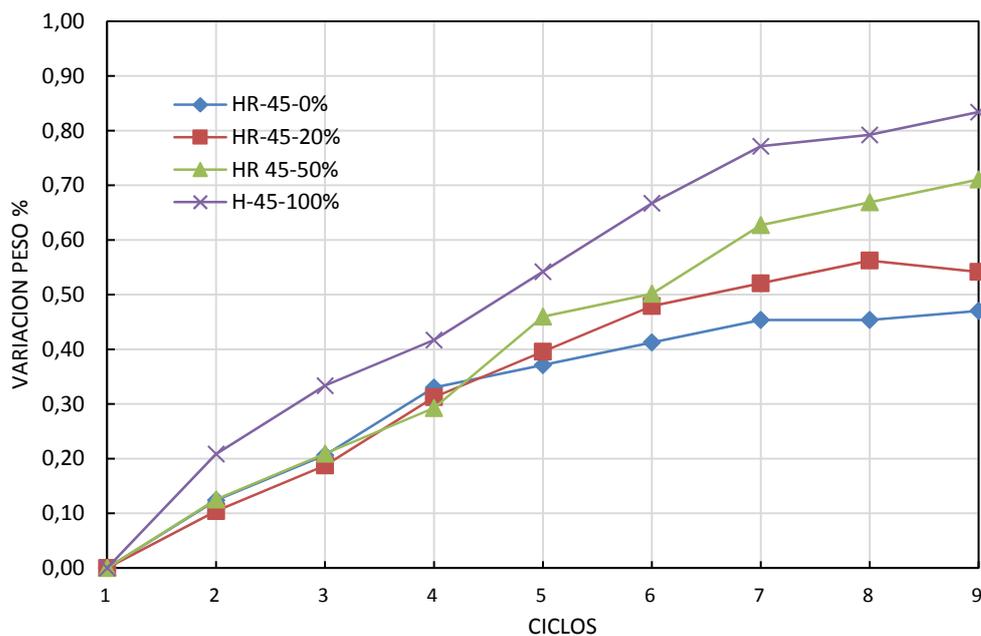


Fig. 208 Gráfico variación de peso en % para el tipo de hormigón HR-45.

En todos los hormigones se observa un aumento progresivo del peso de las probetas, más acusado en los primeros ciclos para estabilizarse. En la Fig. 209 se muestra el proceso de manera esquemática. Este aumento de peso se debe a que los cristales de sulfatos (principalmente cloroaluminatos y etringita) se van formando y van colmatando los poros. La afeción de los cristales sobre los poros afecta mayormente a los hormigones con mayor sustitución de árido reciclado, produciéndose mayor volumen de cristales. Este aumento de peso en una primera fase puede ser positivo, pero a largo plazo puede llevarse a cabo presiones de cristalización que pudieran provocar fisuración en el hormigón.

Esto último depende de la solubilidad de los cristales en el cambio de estado producidos por periodos de humedad-sequedad. Estos periodos de humedad sequedad pueden producir tensiones por recristalización. También es cierto que dependiendo del tamaño de poro en los hormigones con sustitución mayor de AR estas recristalizaciones se pueden acomodar mejor al aumento de volumen que se producen en su interior.

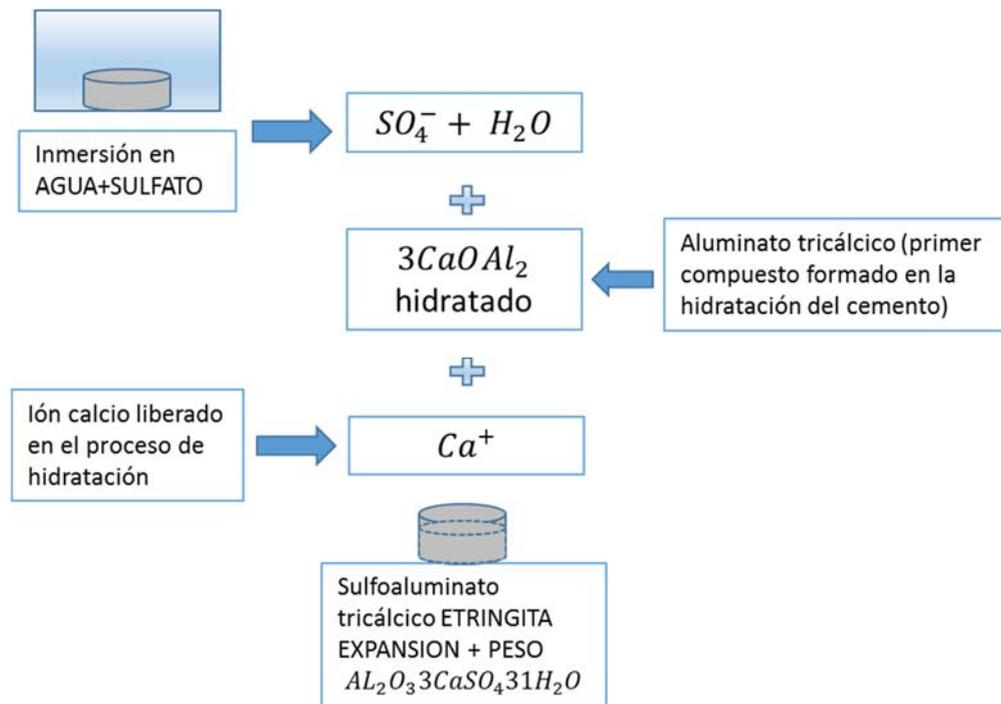


Fig. 209 Esquema de reacciones producidas durante los ciclos de humedad sequedad en sulfatos.

Existen pocas investigaciones relativas al hormigón frente a la afección de sulfatos, pero puede decirse que para proporciones de hasta un 30% el comportamiento es similar al del hormigón convencional. El hormigón afectado por sulfatos, a partir de ensayos realizados a 18 meses, experimentan cambios de longitud, a medida que aumenta el % de sustitución⁴⁹⁵.

También matizaremos que solamente en la posibilidad de que la procedencia de los hormigones se nutria con cemento resistente a los sulfatos, en cuyo caso el comportamiento del hormigón reciclado sería similar al del hormigón convencional⁴⁹⁶.

En la Fig. 210 se muestran los resultados de la velocidad de impulsos ultrasónicos antes y después de los ciclos llevados a cabo, en función de la relación agua/cemento.

⁴⁹⁵ Dhir, R. K. and Limbchiya (1999). "Suitable of recycled concrete aggregate for use BS 5328 Designated Mixes." Structures and Building.

⁴⁹⁶ Lopez-Gayarre, F. (2008). Influencia en la variación de los parámetros de dosificación y fabricación de hormigón reciclado estructural sobre las propiedades físico mecánicas. Departamento de construcción e ingeniería de fabricación, Universidad Oviedo.

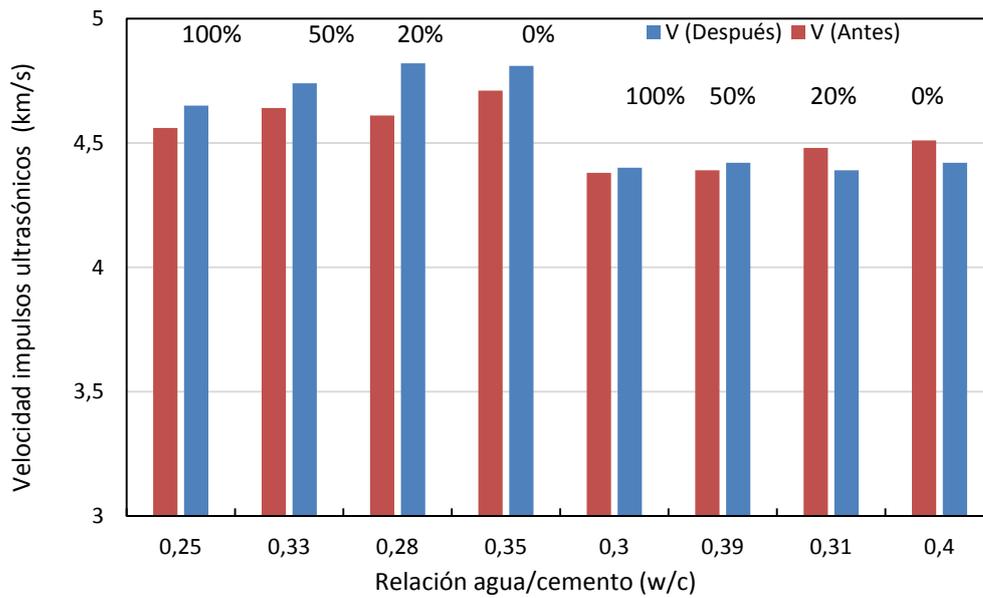


Fig. 210 Gráfico de resultados de velocidad ultrasonidos antes y después del ensayo HR-30.

En la Fig. 211 se especifican los resultados de resistencia a compresión efectuados en las probetas ensayadas después de los ciclos y comparándolas con probetas de referencia.

Las resistencias aumentan después del ensayo, debido a la mayor edad y al efecto de colmatación de los poros producido por las reacciones descritas.

Lo mismo que en el ensayo de agua de mar, se observa una confluencia de las curvas a medida que disminuye la relaciona agua/cemento efectiva. Por el contrario la influencia del árido reciclado es más desfavorable para relaciones agua/cemento bajas.

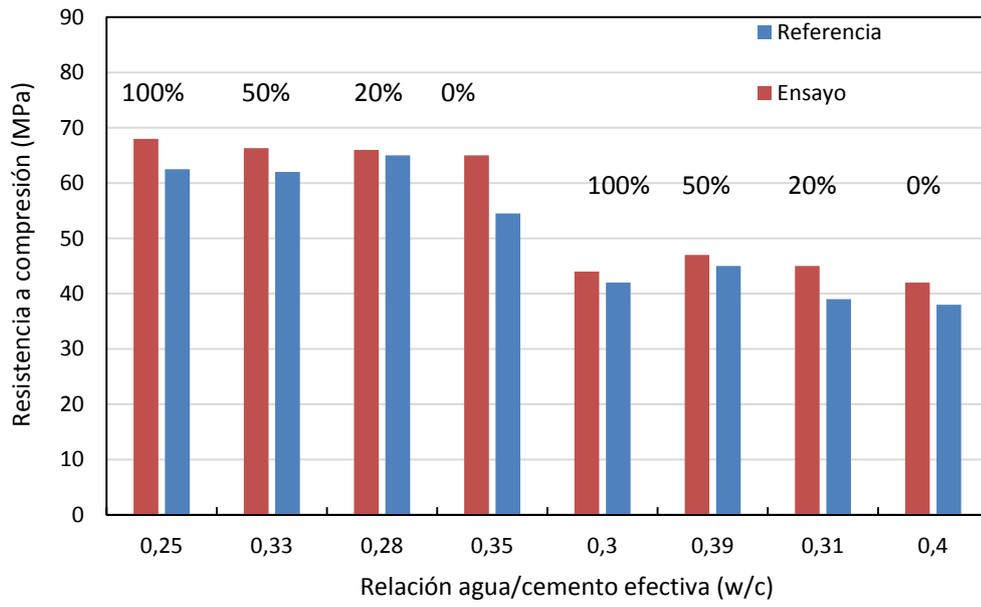


Fig. 211 Gráfico de resultados de resistencia a compresión de las probetas después de los ciclos realizados, comparándolas con probetas de referencia de la misma edad.

4.3. CONCLUSIONES

4.3.1. Conclusiones relativas a las propiedades mecánicas del hormigón

La importante absorción del árido reciclado tiene como consecuencia que la relación agua/cemento efectiva (w/c) se ve reducida, y esto provoca un aumento de resistencia en general. Con la disminución de la relación agua/cemento las resistencias aumentan si bien las diferencias de resistencia encontradas entre el hormigón de control y el hormigón con árido reciclado son mayores, a igualdad de relación agua/cemento, cuando dicha relación agua/cemento es menor. También se deduce que la confluencia de las curvas en relaciones agua/cemento mayores demuestra el buen comportamiento de la pasta nueva.

El módulo de elasticidad disminuye con el grado de sustitución, con aportaciones de árido reciclado del 100% los descensos permanecen por debajo del 9%. El módulo de elasticidad dinámico disminuye también a medida que aumenta el porcentaje de árido reciclado. Los descensos son del mismo orden de magnitud, si bien, los valores correspondientes a los hormigones de menos relación agua/cemento son menores.

La influencia de la presaturación de los áridos reciclados mejora la trabajabilidad pero también disminuye la resistencia a medida que se incorpora una mayor cantidad de árido reciclado.

4.3.2. Conclusiones relativas a la durabilidad

En general las curvas de tendencia de absorción, porosidad, confluyen cuando la relación agua/cemento es pequeña. Esto supone que la incorporación de árido reciclado penaliza en mayor medida a los hormigones de poca calidad.

La mayor parte de las propiedades, no superan los límites de la actual EHE para ambientes IIIa, IIIb, IIIc, Qa, H y F, por lo que pueden ser empleados en aplicación estructurales.

La macroporosidad resultante del estudio de los TAC, resultan valores adecuados para un HAC aumentando para los hormigones con sustitución 100% debido a que el mayor rozamiento de los AR, retienen mayor cantidad de aire, además de los poros incluidos de origen en el AR.

Los valores de retracción son más altos que los obtenidos para los hormigones con vibrado tradicional, especialmente a medida que aumentamos el porcentaje de sustitución.

Sistemas de curado adecuados y el empleo de aditivos específicos a tal efecto, experimentado con éxito en el presente trabajo, pueden ser recomendable sobre todo para piezas superficiales como paneles prefabricados de fachada.

La influencia de las acciones físicas como choque térmico o abrasión resultan valores similares al hormigón de control comportándose adecuadamente.

El comportamiento del hormigón frente a los ciclos hielo-deshielo fue más favorable para el hormigón con relación w/c menor, consiguiendo incluso valores de resistencia sensiblemente superiores a los del hormigón de control y probetas de referencia. Para la relación w/c mayor los resultados reflejan una tendencia de peor comportamiento en general y a medida que aumentamos el grado de sustitución.

El hormigón estudiado se comporta adecuadamente frente a atmosferas agresivas de sulfato y envejecimiento por ciclos.

La simulación de los hormigones estudiados frente a carbonatación acelerada resultaron profundidades muy inferiores a las obtenidas por otros hormigones con AR procedente de otras fuentes o con hormigonado vibrado tradicional. La estimación, por lo tanto, de la vida útil llevada a cabo por diferentes autores mostraron valores muy favorables y por lo tanto acordes a la calidad a la que elemento prefabricado se le debe exigir.

El estudio de la influencia que repetidos ciclos en el tiempo de humedad-sequedad en diferentes fluidos, agua natural, agua de mar y agua con sulfatos, nos determina la capacidad resistente que el hormigón estudiado con AR tiene frente al ataque directo de agresiones químicas, resultando favorable para los tres casos estudiados.

En general podemos decir que la durabilidad del hormigón reciclado estudiado con un porcentaje de un 20% es similar a un hormigón convencional. Sin embargo la mayor porosidad del hormigón reciclado para grados de sustitución mayores y cuando se empleen en ambientes agresivos, el presente estudio dispone de herramientas necesarias para poder decidir en consecuencia, el variar por ejemplo su relación agua/cemento, a partir de los gráficos expuestos en los apartados correspondientes. Esto nos permitirá también aumentar la cantidad de cemento o en último caso aumentar los recubrimientos si fuera necesario.

En definitiva podemos concluir en este apartado la gran capacidad que el hormigón estudiado tiene frente a las agresiones tanto físicas como químicas exigibles a cualquier elemento prefabricado para la aplicación en cualquier ambiente por agresivo que sea.

CAPÍTULO 5. PRUEBA INDUSTRIAL

5.1. INTRODUCCIÓN

Todo el estudio experimental realizado se ha ejecutado en los laboratorios de la Escuela Politécnica de Burgos dentro de los Departamentos de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la Construcción y el Terreno, así como de Ingeniería Civil. Comprobar y extrapolar las dosificaciones empleadas, en el estudio experimental del laboratorio, con los medios, equipos, ambiente, etc., que habitualmente utiliza la empresa de la que provienen los residuos, supone una validación en la evaluación de los resultados obtenidos al incorporar árido reciclado.

En el laboratorio, las condiciones de elaboración de hormigón se han realizado a pequeña escala: amasadas de entre 30-80 litros. Sin embargo, la aplicación de los hormigones destinados a elementos prefabricados han de ser contrastadas con los medios disponibles a gran escala, es decir con amasadas de varios metros cúbicos que habitualmente se elaboran en la empresa de prefabricados, incorporando el árido reciclado.

Es por lo tanto la comprobación y valoración de la incidencia que supone incorporar el AR en el proceso industrial, con relación al hormigón de control y aplicado a elementos estructurales el objetivo primero de este capítulo.

5.2. MODELO EXPERIMENTAL INDUSTRIAL

El modelo experimental se ha llevado a cabo en la central de hormigonado de la propia fábrica, incorporando el árido reciclado resultante ya caracterizado en el capítulo anterior.

Con la amasada así obtenida se incorpora dentro del proceso industrial y se elaboran una serie de elementos prefabricados a escala real con el fin de someterlos a ensayos referentes a su comportamiento estructural: es decir, ensayo flexión, cortante y deformación.

Se han elaborado una serie de vigas empleando las dosificaciones de HR-45-100% en planta. Se han contrastado estas disposiciones con vigas de control, dentro de la producción habitual de la factoría.

Los ensayos llevados a cabo son:

- *Ensayo a deformación instantánea.*

- Ensayo a flexión.
- Ensayo de flexión-cortante.
- Ensayo a cortante.
- Ensayo de deformación diferida.

Para los ensayos de flexión, cortante y deformación diferida se han utilizado secciones de viga de 12x24 cm y de 1,50 m de longitud y para el ensayo de flexión-cortante se ha utilizado una pieza de 1,0 m de longitud un metro con sección de 24x24 cm aprovechando las bancadas continuas de panel prefabricado.

Las vigas que se ensayaron a flexión, se instrumentaron a fin de obtener los diagramas de carga-deformación para deformaciones instantáneas y diferidas, estableciendo los correspondientes despieces de fisuración con abertura y separación de fisuras.

5.2.1. Definición de los elementos prefabricados vigas

Los despieces de las vigas se especifican en la Fig. 212 y se han elaborado siguiendo las prescripciones del Capítulo 13 de la EHE-08 ejecución.

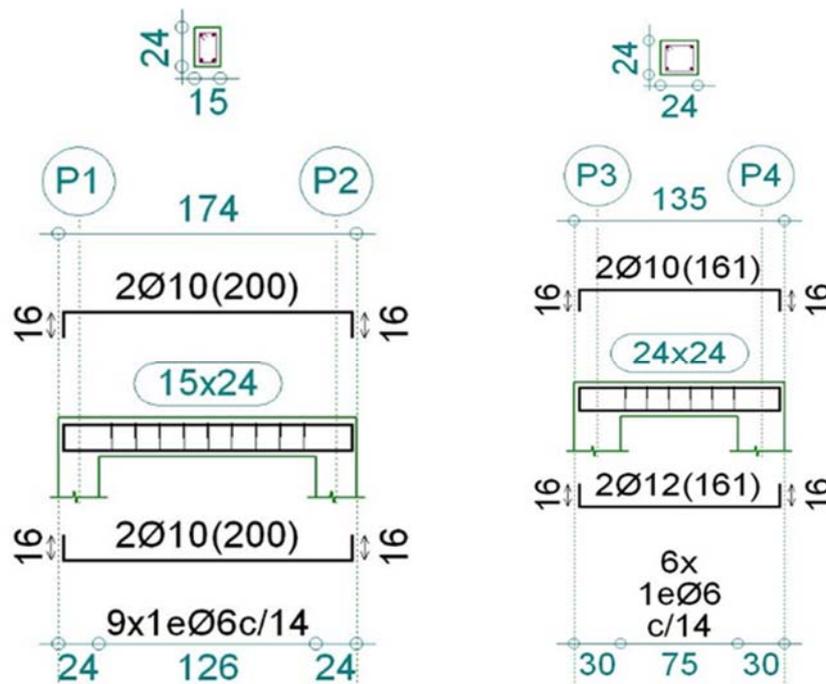


Fig. 212 Despiece vigas 12x24 y 24x24, unidades en cm.

Los datos de la sección y sus características quedan reflejados en la Tabla 89.

Tabla 89 Características geométricas de la viga de 12x24 cm.

Geometría	Ud	Sección bruta	Sección homogeneizada
A	m ²	0,0288	0,031
I _x	m ⁴	0,0001	0,0002
I _y	m ⁴	0,0000	0
i _x	m ³	0,0700	0,07
i _y	m ³	0,0300	0,03

Para el cálculo de los momentos de fisuración, servicio y último, además del cortante último se ha recurrido a prontuario informático de hormigón⁴⁹⁷. Conocida la sección y armadura podemos plantear las ecuaciones de equilibrio de la sección y así obtener la capacidad de la viga, para un nivel de control normal $\gamma_c = 1,5$ y $\gamma_s = 1,10$ (Fig. 213), atendiendo al estado límite de sollicitaciones normales (artículo 42º EHE-08). Para el estado límite de agotamiento a cortante, aplicaremos el artículo 44º de la EHE-08. En la Tabla 90 se muestran los momentos obtenidos y las cargas puntuales (P) que el pistón transmite a la viga según el esquema anteriormente reflejado. En todos los casos se ha tenido en cuenta el peso propio de la viga.

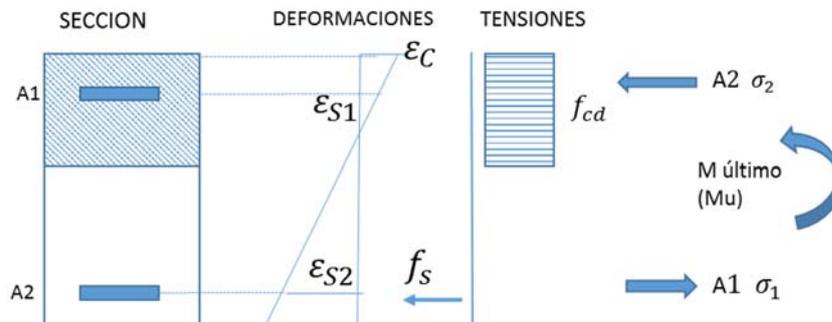


Fig. 213 Planteamiento sección de equilibrio

Tabla 90 Características mecánicas de la viga de 12x24cm.

Tipo	Ud	Momento	P (N)
Mf (Momento fisuración)	N.m	4900	13067
Ms (Momento servicio)	N.m	7500	20000
Mu (Momento último)	N.m	12000	32000

Los resultados comparativos teóricos de la capacidad resistente se muestran en la Tabla 91.

⁴⁹⁷ Corres, H., Perz, A. and Martínez, J. I. (2008). Prontuario informático del hormigón estructural 3.1 EHE-08 IECA. Universidad Politécnica de Madrid.

Tabla 91 Valores de cortante últimos de la viga de 12x24 cm.

Designación	Valor en N
V_{cu} (Contribución del hormigón a la resistencia)	14900
V_{su} (Contribución de la armadura transversal)	28500
V_u (Cortante último)	43400

Las características geométricas, mecánicas y capacidad resistente de la viga de sección 24x24 cm y longitud 1,0 m se exponen en la Tabla 92 y Tabla 93.

Tabla 92 Características geométricas de la viga de 24x24 cm.

Geometría	Ud	Sección bruta	Sección homogeneizada
A	m ²	0,0288	0,0310
lx	m ⁴	0,0001	0,0002
ly	m ⁴	0,0000	0,0000
ix	m ³	0,0700	0,0700
iy	m ³	0,0300	0,0300

Tabla 93 Características mecánicas viga 24x24.

Tipo	Ud.	Momento flexión	P (N)
Mf (Momento fisuración)	N.m	9400	25067
Ms (Momento servicio)	N.m	11500	30050
Mu (Momento último)	N.m	17700	47580
Vd (cortante último)	N		54600

5.2.2. Materiales y dosificación empleada

Los materiales empleados para las dosificaciones con las cuales se moldeó el hormigón dentro de la fábrica, fueron los áridos naturales, filler y cemento, referenciados en el Capítulo 3.

Los áridos no se sometieron a ninguna presaturación, incorporándolos a las tolvas respetando las condiciones habituales de trabajo en la propia planta y el proceso de fabricación.

La Tabla 94 recoge las dosificaciones empleadas en la prueba industrial.

Tabla 94 Dosificaciones empleadas en la fase industrial.

Mezcla	Ud.	HR-45-0	HR-45-100%
Arena (0/2)	kg	650	720
Grava (2/12,5)	kg	1150	0

Mezcla	Ud.	HR-45-0	HR-45-100%
AR (4/12,5)	kg	0	1040
Filler Calizo	kg	280	280
Syca 20HE	g	550	890
Syca 5920	g	1320	2200
Cemento	kg	320	320
Agua	l	112	112

5.2.3. Proceso de amasado y ejecución

El proceso de amasado del hormigón se realizó con la central de hormigonado de la fábrica. La central está controlada mediante un software que coordina los pesos de cada componente, introduciendo las distintas fórmulas y rectificando la cantidad de agua según las lecturas de las sondas de humedad incorporadas en la arena. Así mismo la cantidad de arena queda también corregida en función de la humedad siempre sin sobrepasar la relación a/c correspondiente, Fig. 214.

Para el árido grueso, que permanece con anterioridad en las tolvas normalmente se considera en estado seco, lo que supone un pequeño porcentaje de aporte de humedad (0-0,5%) mediante unas galgas de humedad, controlado y corregido desde la central de hormigonado. En nuestro caso, los áridos reciclados se introducen con anterioridad en las tolvas para simular el mismo estado. El árido reciclado se introduce sin lavar con el fin de situarnos en la condición más desfavorable posible.

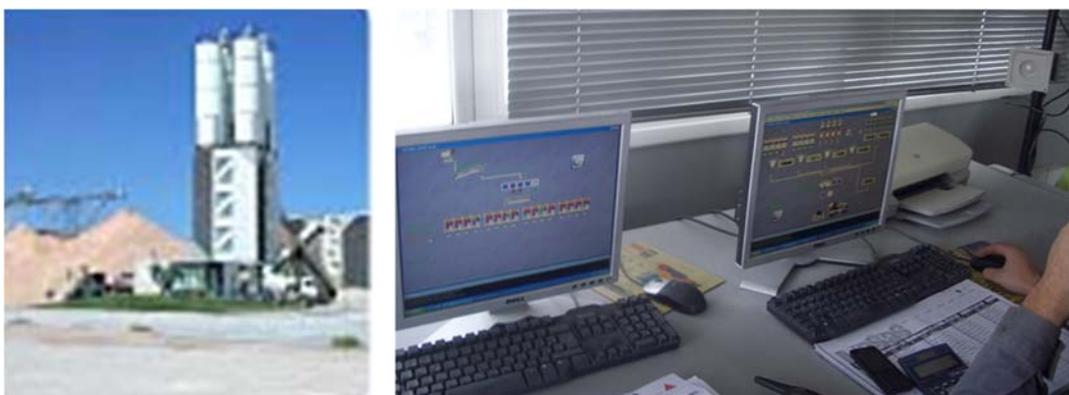


Fig. 214 Central de hormigonado y autómata de control de dosificaciones.

La capacidad de la amasadora planetaria es de 3 metros cúbicos incorporando los componentes mediante skips según la secuencia marcada por el autómata.

En la Fig. 215 se aprecia la magnitud de la amasadora y la distribución de la mezcla del hormigón en el interior mediante palas movidas hidráulicamente.



Fig. 215 Amasadora planetaria de capacidad máxima 3 m³ y mezclado de los componentes que forman parte del hormigón.

En la Fig. 216 se muestra los cubilotes de capacidad 1 m³ que se utilizan para el traslado del hormigón fresco hasta la nave de ubicación de los moldes.



Fig. 216 Cubilotes para transporte de hormigón fresco a la nave de prefabricados.

En la Fig. 217 se muestra la bancada universal de 150 m de longitud correspondiente a los paneles de cerramiento, donde se ubican los moldes de las vigas, objeto de la prueba industrial. A la vez que se ejecuta el hormigonado de las piezas prefabricadas, también se procede al relleno de los moldes de las probetas que completan la presente prueba industrial.



Fig. 217 Vista de la nave industrial donde se realizó el proceso de elaboración de los elementos prefabricados.

En la Fig. 218 se muestra la ejecución de los moldes, con sus costeros de material polimérico y sujeción con imanes, sobre la bancada con una sección de 24x24 cm.



Fig. 218 Molde preparado en la bancada de los paneles con sujeción de costeros mediante imanes.

El vertido del hormigón sobre los moldes queda reflejado en Fig. 219. El accionamiento de la boca es hidráulica es manejado por un operario mediante un automatismo de precisión que permite la apertura y cierre controlada. El vertido del hormigón se realizó de manera gradual repartiendo en diferentes tongadas que se reparten uniformemente.



Fig. 219 Hormigonado mediante cubilote de capacidad 1 m³ y apertura de la boca hidráulica.

5.2.4. Ensayos realizados

5.2.4.1. Materiales componentes

Acero: en la armadura pasiva se empleó acero B-500-SD provisto de certificado de garantía marcado CE.

Hormigón: para cada una de las amasadas se tomaron probetas de control.

5.2.4.2. Elementos estructurales

Las vigas se sometieron los ensayos de rotura pasados los 28 días desde la fabricación.

Las cargas consideradas en las vigas que se sometieron a ensayo se determinaron según las siguientes premisas:

- *La carga se aplica de manera continua hasta alcanzar la rotura de la misma. En los estados intermedios se comprueban las solicitaciones y estados límites últimos con el fin de validar que la capacidad real supera a los teóricos.*
- *Para los ensayos de deformación diferida como carga estática continua estable en el centro del vano.*

Estas se sometieron a carga continua constante, obteniendo directamente mediante software (Flex-text V2.1) de la prensa, los gráficos de carga-desplazamiento. Durante el ensayo se toma lectura de las solicitaciones límite, registrando la fisuración de las vigas en su cara exterior para los escalones de carga correspondientes al:

- *Momento de fisuración. Es aquel cuya carga sucede la primera fisura.*
- *Momento de servicio. La carga actuante de las solicitaciones sin mayorar.*
- *Momento último. Es la carga teórica que genera el agotamiento viga.*
- *Momento y cortante de rotura. Es la carga que origina el colapso de la viga. La grafica puede mostrar cambio de pendiente, si bien la sección ya no es eficaz pues la pieza está excesivamente fisurada y deformada.*

La prensa dispone de una unidad hidráulica de capacidad 100 t dispuesta con una unidad de medida electrónica de 5 canales, con la posibilidad de exportar los datos generados por el software en una hoja de cálculo.

El actuador, Fig. 220 es de la marca MTS modelo 201.70HF con una capacidad (Force comp 328.2Kip) de 1460 kN en compresión y una capacidad de 962,5 kN en tracción. El transductor es de la marca MTS Modelo 661.31F-01 de capacidad 1000 kN. El programa de gestión de datos es Flex Tet GT V2.1. La velocidad de la carga adoptada para los ensayos de rotura es de 5 kN/s.

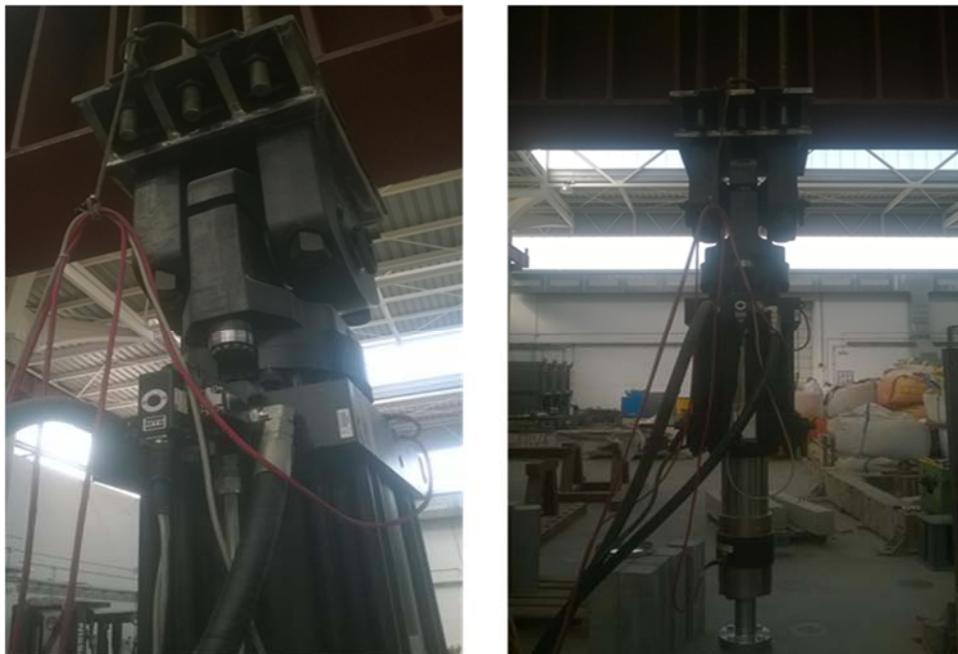


Fig. 220 Fotos del actuador y el transductor de capacidad 1000 kN.

La prensa está diseñada para aplicar la carga continua, midiendo en todo momento el desplazamiento del pistón hidráulico. La prensa se interrumpe en cada escalón para comprobar y poder documentar las fisuras aparecidas.

5.2.4.2.1. Ensayo a flexión

El ensayo de flexión se introduce según el siguiente esquema Fig. 221.

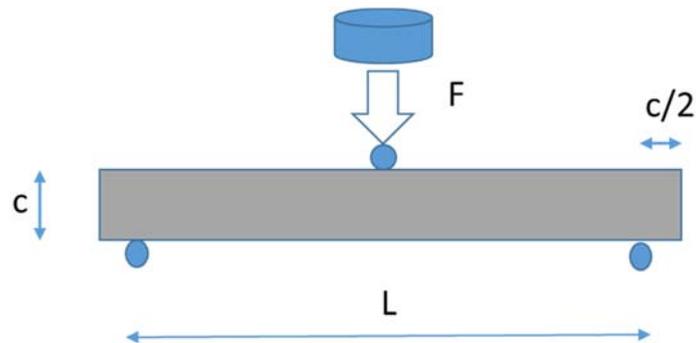


Fig. 221 Esquema estructural adoptado para el ensayo de deformación instantánea y flexión.

Siendo:

F fuerza aplicada al transductor.

C canto viga.

L longitud viga.

En la Fig. 222 se muestra la composición del ensayo a flexión.



Fig. 222 Transductor y apoyo del pistón sobre rodillo para carga a flexión.

El software empleado (Fig. 223), es el programa de tratamiento de datos Flex Text V2.1 y su labor fundamental es la de proporcionar los valores de accionamiento del transductor que ejerce la fuerza sobre el pistón hidráulico, así como la medición, en el tiempo, de la fuerza y desplazamiento.

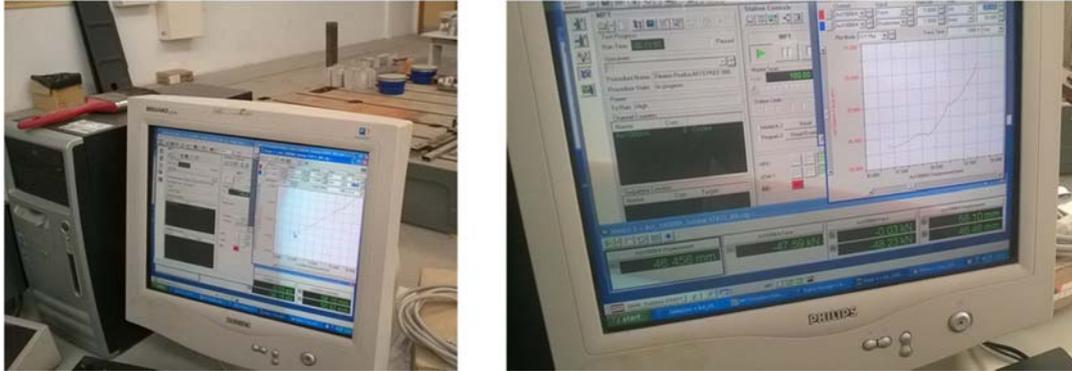


Fig. 223 Software empleado para el manejo de la velocidad del transductor hidráulico, así como de la medición de los datos de desplazamiento y fuerza.

En la Fig. 224 se especifica los posibles resultados una vez que el accionamiento tiene lugar en el caso de la viga a flexión. Se determinan varias paradas, con el fin de observar y reflejar las fisuraciones que se origina.



Fig. 224 Ensayo de flexión realizado con carga puntual. Señalización de las fisuras y progresión entre ellas con líneas de punto.

Las comprobaciones que se realizarán serán la obtención de la reserva de seguridad y el coeficiente de aviso.

La determinación de la reserva de seguridad está comprendida entre el momento último y la rotura real y se calcula mediante la siguiente expresión (84):

$$R(\%) = \frac{M_r - M_u}{M_r} \times 100 \quad (84)$$

Siendo:

M_u momento último teórico extraído del prontuario.

M_r momento de rotura.

Para estimar la capacidad de la viga, consultando la bibliografía específica⁴⁹⁸ de este tipo de ensayos y de acuerdo con el Instituto Eduardo Torroja de Madrid recomendaba se determina el coeficiente de aviso, cuya expresión es (85):

$$\text{Coeficiente de Aviso} = \frac{Mu}{M_{fis}} > 1,2 \quad (85)$$

Donde:

Mu momento último.

M_{fis} momento de fisuración.

5.2.4.2.2. Ensayo a cortante

Para el ensayo a cortante, el esquema estructural sería el siguiente (Fig. 225).

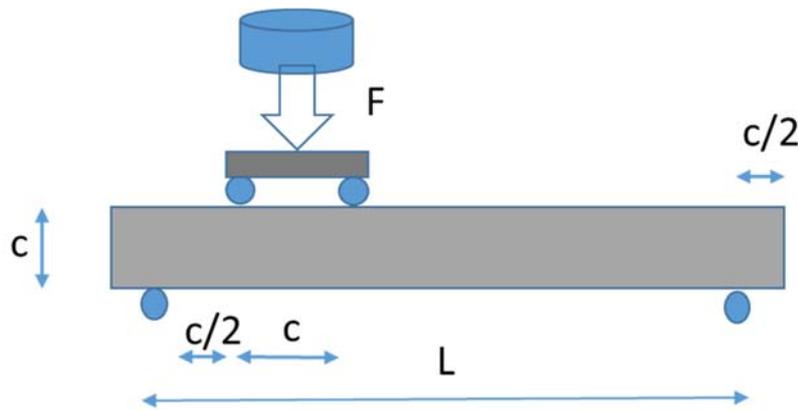


Fig. 225 Esquema estructural del ensayo a cortante

F fuerza aplicada con el transductor.

C canto viga.

L longitud viga.

En la Fig. 226 se muestra la bancada y distribución de las fuerzas actuantes:

⁴⁹⁸ Afnor (1992-2010). Encyclopedy du Batimant. Paris.



Fig. 226 Composición del ensayo a cortante.

De manera análoga a la flexión también se determina la reserva de seguridad mediante la siguiente formulación.

La determinación de la reserva de seguridad está comprendida entre el momento último y la rotura real y se calcula mediante la siguiente expresión (86):

$$R(\%) = \frac{V_r - V_u}{V_r} \times 100 \quad (86)$$

Siendo:

V_u cortante último teórico extraído del prontuario.

V_r cortante de rotura.

5.2.4.2.3. Ensayo carga deformación diferida

Para la prueba de carga a deformación diferida se dispuso del siguiente dispositivo reflejado en la Fig. 227.

El ensayo consistirá en incorporar una fuerza constante durante un periodo prolongado de tiempo. Para ello, con las dimensiones de la viga, se evalúa la carga de servicio a disponer, extraída de los cálculos realizados anteriormente y que se va a reproducir mediante dos depósitos de agua de capacidad máxima 1000 l, que transmiten su carga mediante un perfil metálico de suficiente rigidez (HEB-160), el cual puntualmente trasmite dicha carga en el centro de la viga.

Para la disposición de los depósitos, se aprovecha la infraestructura del taller de Ingeniería Civil que consta de un sótano, al que atraviesan perforaciones, que sirve como bancada universal, de dimensiones 0,80x0,80 m. El esquema se reproduce en la Fig. 227.

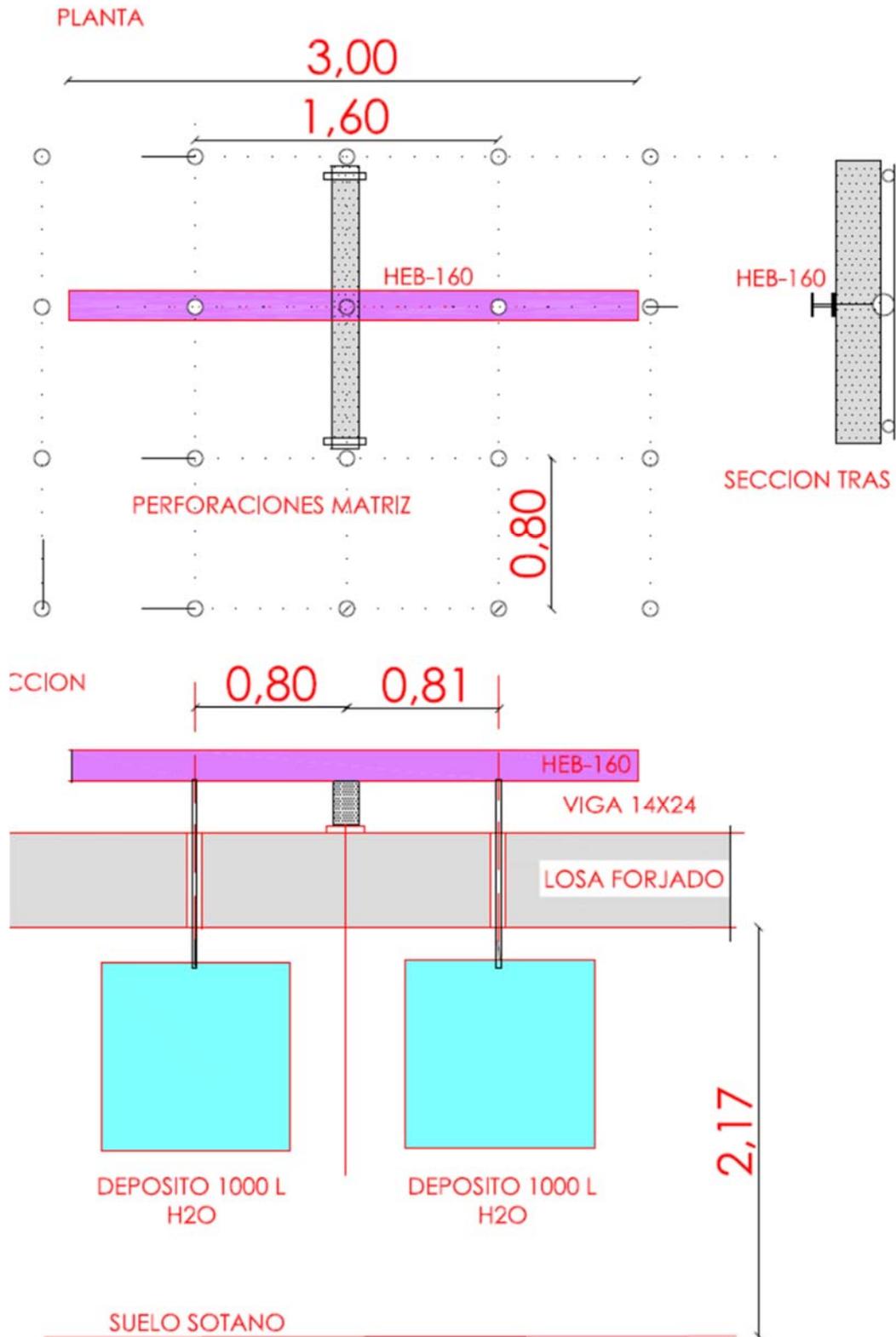


Fig. 227 Esquema ideado para el ensayo de viga sometida a carga constante para comprobación flecha diferida.

En la Fig. 228 se muestra la disposición del perfil y la suspensión de los depósitos en el sótano mediante unas eslingas de capacidad suficiente.



Fig. 228 Ensayo de deformación a carga constante para comprobación flechas diferidas. Colocación viga y eslingas de depósitos previo al llenado para su nivelación.

En la Fig. 229 se muestra la colocación del medidor de la deformaciones que se producen, flexómetro de características marca *Pecock* de precisión 0,01x30 mm, mediante una estructura auxiliar.



Fig. 229 Colocación del dispositivo de medición con nivelación soportes.

El llenado se refleja en la Fig. 230 mediante manguera de manera gradual en los dos depósitos.

Las mediciones de la deformación mediante el flexómetro se realizan semanalmente comprobando cualquier incidencia.



Fig. 230 Llenado depósitos de manera gradual para evitar desplomes.

Los resultados de la prueba industrial quedan reflejados en los siguientes apartados.

5.3. RESULTADOS ENSAYOS REALIZADOS EN EL HORMIGÓN EN MASA

5.3.1. Resistencia a compresión

Los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia del hormigón realizados en la prueba industrial se muestran en las Tabla 95 y Tabla 96, siendo su relación agua/cemento efectivas, las mismas que las consideradas en las amasadas de laboratorio, ya que la incorporación del árido reciclado se realiza en seco y se corrigen mínimamente las condiciones de humedad de los áridos naturales semejantes al laboratorio.

Tabla 95 Resultados de los ensayos de compresion de la prueba industrial con curado en cámara.

Resistencia a compresión (MPa)	Curado normalizado			
	24 H	7 días	28 días	180 días
HR-45-0% (Control)	34	56	62	64
HR-45-100%	36	55	64	66

Tabla 96 Resultados ensayos de compresión prueba industrial curado exterior.

Resistencia a compresión (MPa)	Curado ambiente exterior			
	24 H	7 días	28 días	180 días
HR-45-0% (Control)	31	59	60	60
HR-45-100%	33	57	58	62

Los resultados obtenidos a las 24 horas suponen casi un 75% de la resistencia característica, con un comportamiento adecuado para la prefabricación, sobre todo si la aplicación es en piezas de hormigón. El resto de resultados a las edades de 7, 28 y 180 días son sensiblemente más bajos que los resultados de laboratorio. Los resultados del ensayo de resistencia compresión con curado exterior son sensiblemente inferiores a los obtenidos con curado normalizado en cámara, siendo el comportamiento prácticamente similar.

Si representamos los resultados de autocontrol interno de calidad correspondiente a la ISO-9001, y a la edad de 28 días, se obtiene la Fig. 231.

En la Fig. 231 se representa la amasada efectuada en el día de la prueba industrial, insertada con los resultados correspondientes a los ensayos de autocontrol realizados en la fecha correspondiente. Los valores medios del hormigón HR-45-100% quedan por encima de la línea de tendencia media y un 8% mayor que el hormigón de control.

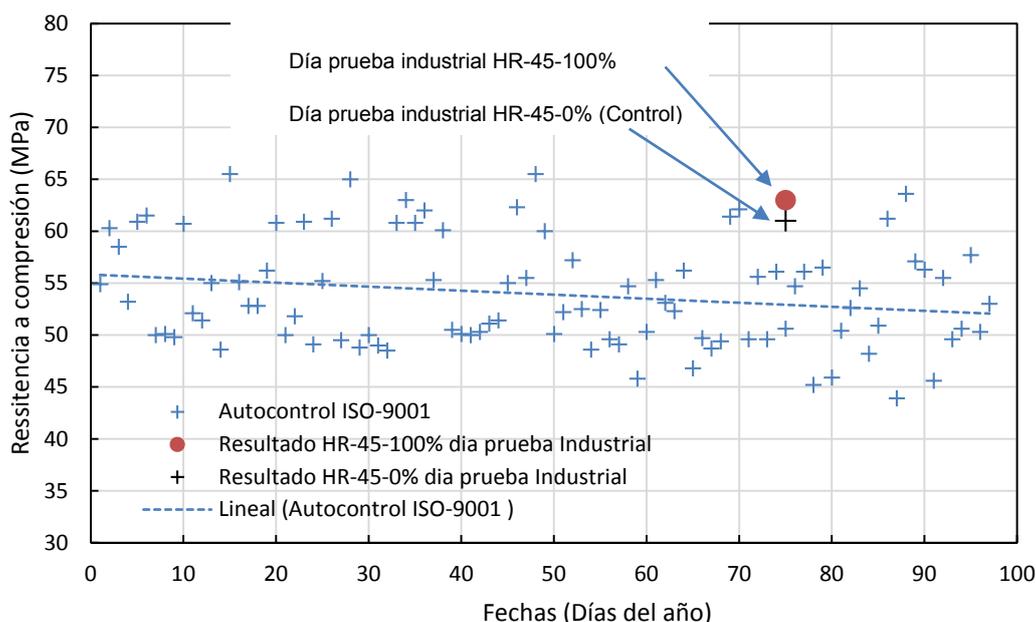


Fig. 231 Resultados del autocontrol de calidad Artepref HR-45-0% y resultado día de la prueba industrial con HR-45 con grado de sustitución AR del 100%.

Los resultados de laboratorio del ensayo de compresión del hormigón patrón y el obtenido con sustituciones del 100% presentan una mayor diferencia, de un 14%, probablemente debido a un mejor ajuste de las humedades y aditivos.

Los resultados de las probetas correspondientes a sustituciones de 100% de árido natural por árido reciclado, amasadas en la central de hormigonado de Artepref se encuentran por encima de la media con tendencia ascendente. Esto es debido a la

relación agua/cemento efectiva w/c , que por la propia absorción de agua del AR mejora las resistencias.

Los valores medios y de desviación típica de la muestra de la gráfica anterior verifican para un nivel de confianza del 95%.⁴⁹⁹

$$f(x) = \bar{x} - 1.64 \sigma = 53,69 - 1,64 \times 5,16 = 45,22 \text{ MPa} > f_{ck} = 45 \text{ MPa} \quad (87)$$

5.3.2. Tracción indirecta

Los resultados de tracción indirecta realizados en la prueba industrial quedan reflejados en la Tabla 97.

Tabla 97 Resultados de tracción indirecta obtenidos en la prueba industrial.

Tracción indirecta (MPa)	Edad 28 días			Curado normalizado	
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	f_{Media}	Laboratorio
HR-45-0%	5,8	5,7	5,8	5,75	5,30
HR-45-100%	5,7	5,3	5,7	5,56	5,00

Los valores resultantes correspondientes a la prueba industrial son muy similares a los de la prueba de laboratorio en lo que se refiere al hormigón de control, sin embargo se aprecia una mejora en la resistencia a tracción en el hormigón en la sustitución de 100% de AR respecto a los valores de laboratorio, siendo éstos ligeramente inferiores al hormigón de control de la prueba industrial.

El comportamiento de los hormigones fabricados en la prueba industrial, es similar a los elaborados en el laboratorio y por tanto adecuados para la ejecución de las vigas.

5.3.3. Ensayo de absorción y porosidad

El ensayo de absorción y porosidad llevado a cabo proporciona los siguientes resultados reflejados en la Tabla 98 y Tabla 99.

⁴⁹⁹ Artículo 86.5.4.3 EHE-08

Tabla 98 Resultados de los ensayos de absorción de la prueba industrial y comparación con los resultantes de laboratorio.

Resultados ensayos Absorción (% Peso)	Edad 28 días	
	Prueba Industrial	Curado normalizado Laboratorio
HR-45-0% (Control)	3,30	2,95
HR-45-100%	3,82	3,20

Tabla 99 Resultados de los ensayos de porosidad de la prueba industrial y comparación con los resultantes de laboratorio.

Resultados ensayos Porosidad (% Volumen)	Edad 28 días	
	Prueba Industrial	Curado normalizado Laboratorio
HR-45-0% (Control)	5,50	5,15
HR-45-100%	6,10	6,00

Los resultados de absorción obtenidos en la prueba industrial son un 10% y un 16,25% mayor que los obtenidos en la prueba de laboratorio.

Los resultados comparativos de porosidad entre la prueba industrial y los efectuados en el laboratorio son prácticamente análogos y coherentes con el estudio realizado.

5.3.4. Penetración de agua bajo presión

Los resultados del ensayo de penetración de agua bajo presión quedan reflejados en la Tabla 100.

Tabla 100 Resultados del ensayo de penetración de agua bajo presión de la prueba industrial y comparada con la prueba de laboratorio.

Resultados ensayos penetración agua bajo presión (mm)	Edad 28 días	
	Prueba Industrial	Curado normalizado Laboratorio
HR-45-0% (Control)	18	16
HR-45-100%	16	18

Los valores obtenidos en la prueba industrial son similares a los obtenidos en la prueba de laboratorio.

5.3.5. Fisuración por retracción

Los resultados obtenidos a partir de las probetas obtenidas en la prueba industrial para HR-45 de referencia y con sustitución 100% y las probetas realizadas en laboratorio se reflejan en la Fig. 232 y Fig. 233.

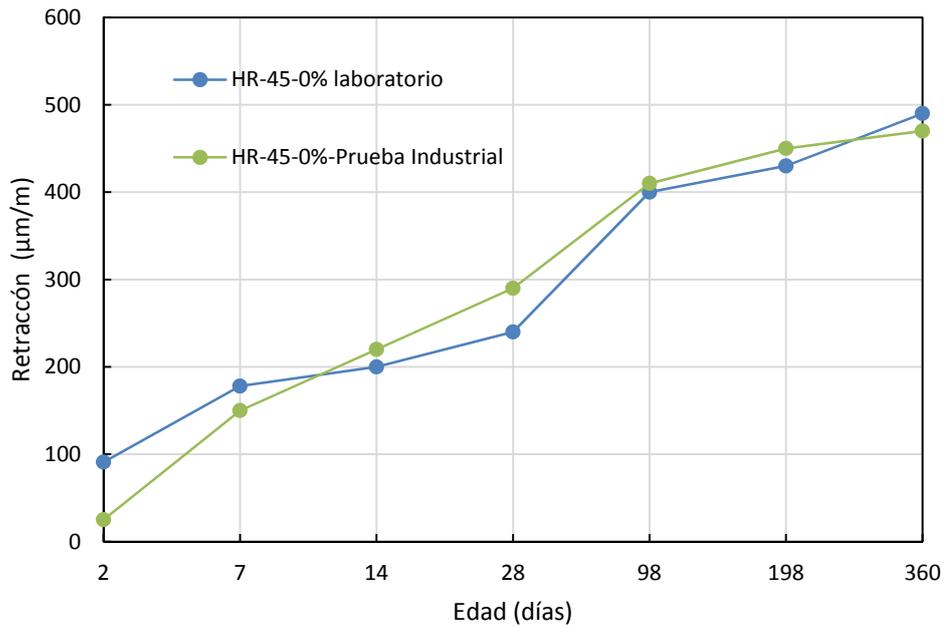


Fig. 232 Gráfico comparativo ensayo industrial y ensayo en laboratorio para HR-45-0%.

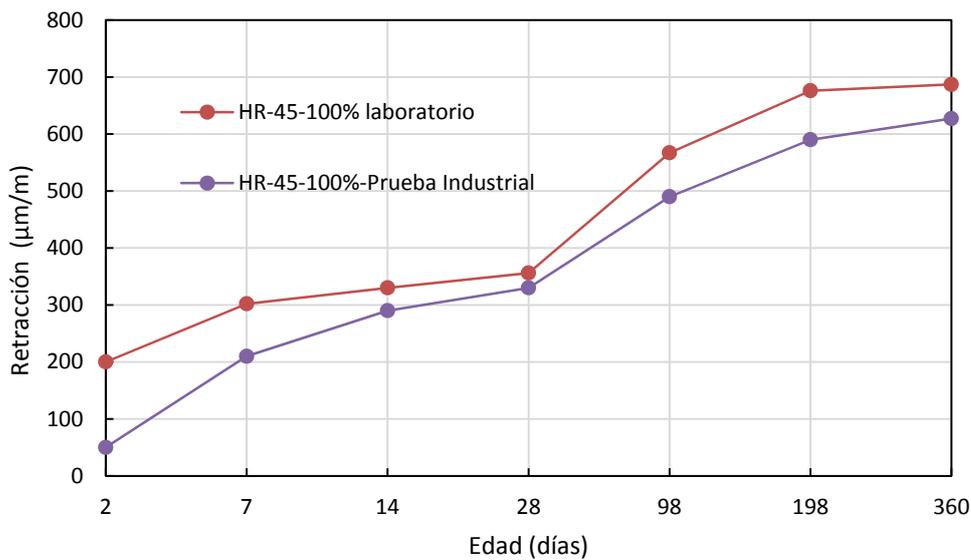


Fig. 233 Gráfico comparativo ensayo industrial y ensayo en laboratorio para HR-45-100%

Los resultados obtenidos en la prueba industrial son similares a las probetas fabricadas en laboratorio, significando solamente que la retracción resultante en la prueba industrial presenta valores algo más bajos

5.4. RESULTADOS ELEMENTOS ARMADOS

5.4.1. Rotura a flexión

En la Fig. 234 se reflejan los resultados correspondientes a los momentos anteriores en una grafica carga puntual (P), y desplazamiento. Los tramos horizontales son interrupciones realizadas a la carga continua para poder documentar la fisuración que se produce y comprobacion correspondiente.

También reflejamos la fisuración y apertura de fisura de los diferentes estados de carga.

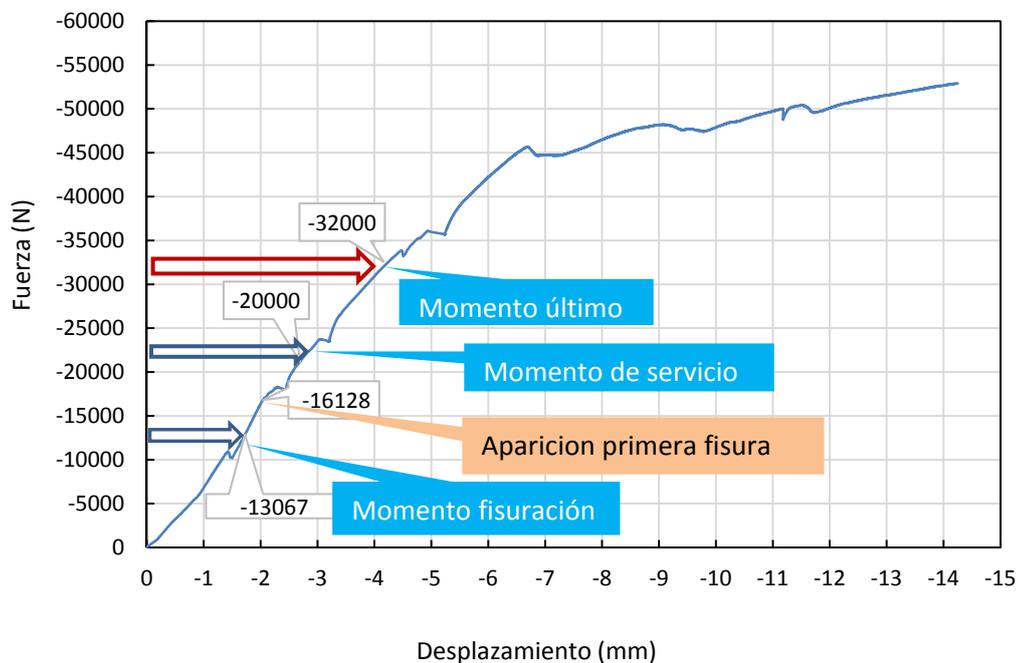


Fig. 234 Tres estados: Momento fisuración, Momento servicio, Momento último y esfuerzo coincidente con la aparición de la primera fisura.

En la Fig. 235 se observa la primera fisura cuyo valor según el gráfico anterior es de 16079 N, mayor que la carga teórica de fisuración (13067 N).



Fig. 235 Aparición primera fisura. Vista lateral e inferior vista mediante espejo.

En la Fig. 236 se representa la línea carga-desplazamiento, apreciándose claramente que la rotura de la viga se produce en un punto, en el cual la pendiente de la curva se convierte en prácticamente horizontal, debido a que la sección no es capaz de asimilar un mayor esfuerzo.

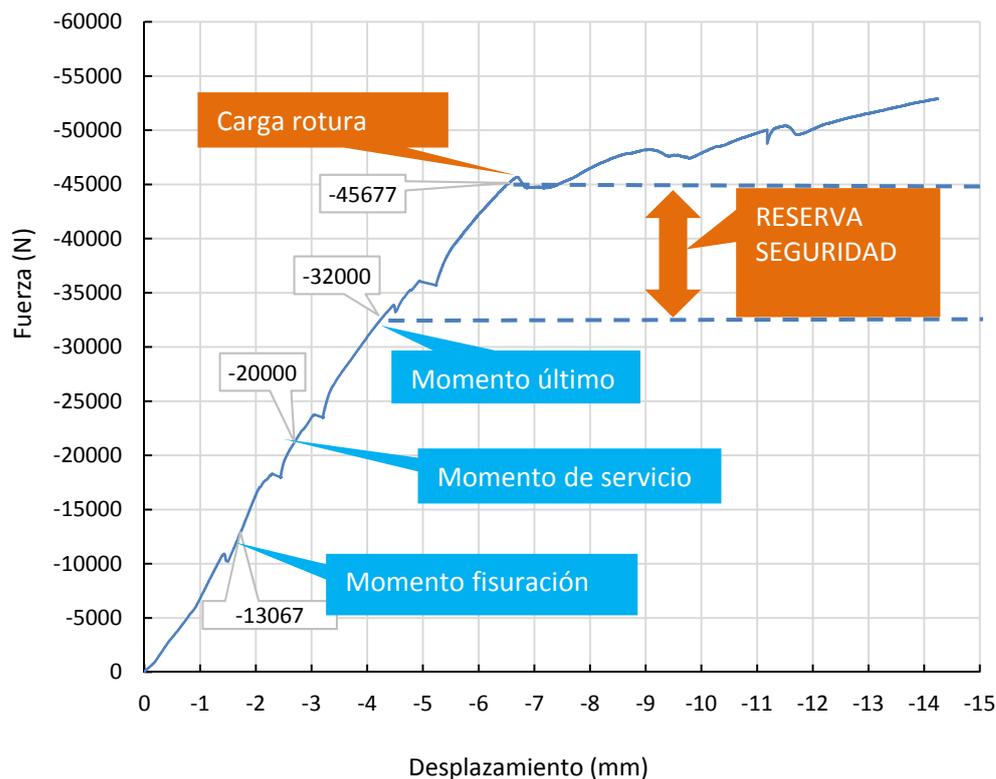


Fig. 236 Carga resultante del momento de fisuración, servicio último y rotura de la viga producido en el punto de cambio de pendiente. Viga 12x24 100% AR.

La reserva de seguridad se especifica en (88):

$$R(\%) = \frac{45677 - 32000}{45677} \times 100 = 30,39\% \quad (88)$$

Para el caso que nos ocupa el coeficiente aviso (89):

$$\text{Coeficiente de Aviso} = \frac{Mu}{M_{fis}} = \frac{32000}{13065} = 2,44 \quad (89)$$

Coeficiente claramente holgado, lo que demuestra un muy buen comportamiento estructural.

La fisuración que aparece a partir de la primera fisura muestra un reparto de las mismas, adyacentes a la primera, y la progresión de las ya iniciadas Fig. 237.

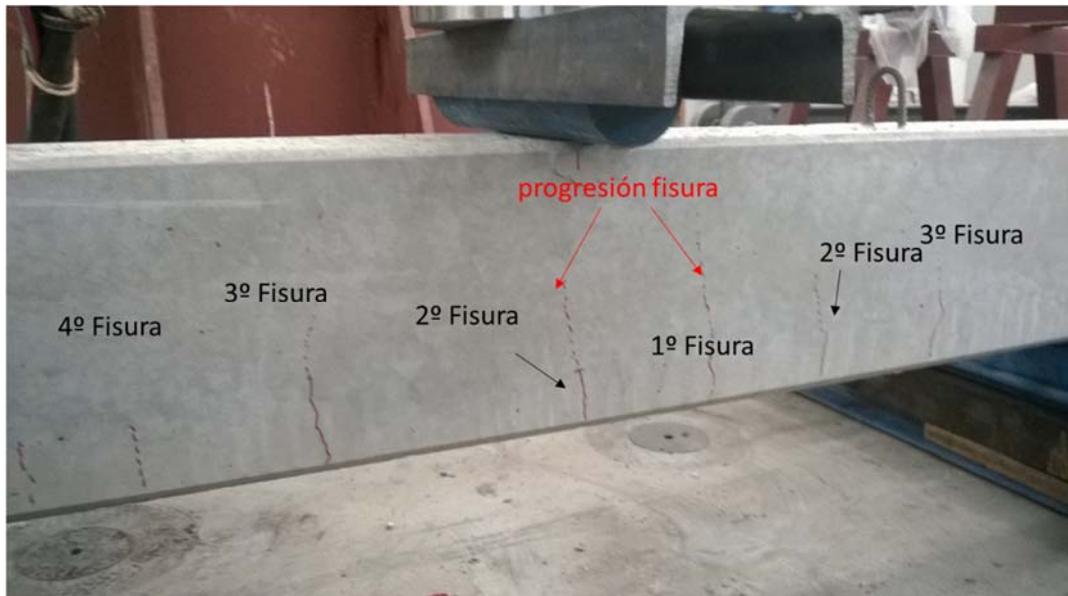


Fig. 237 Foto donde se reflejan las fisuras obtenidas y la progresión de las mismas a medida que la fuerza aumenta (viga 12x24, 100% AR).

El tipo de rotura se produce por flexión pura. En la rotura por flexión pura, el hormigón comprimido se aplasta en la región central de la viga, en la cual existe muy poca interferencia del esfuerzo cortante, y por este motivo aparecen solamente fisuras verticales.

En la Fig. 238 se aprecia la aparición de fisuras intermedias debido al agotamiento por compresión en la cara superior.

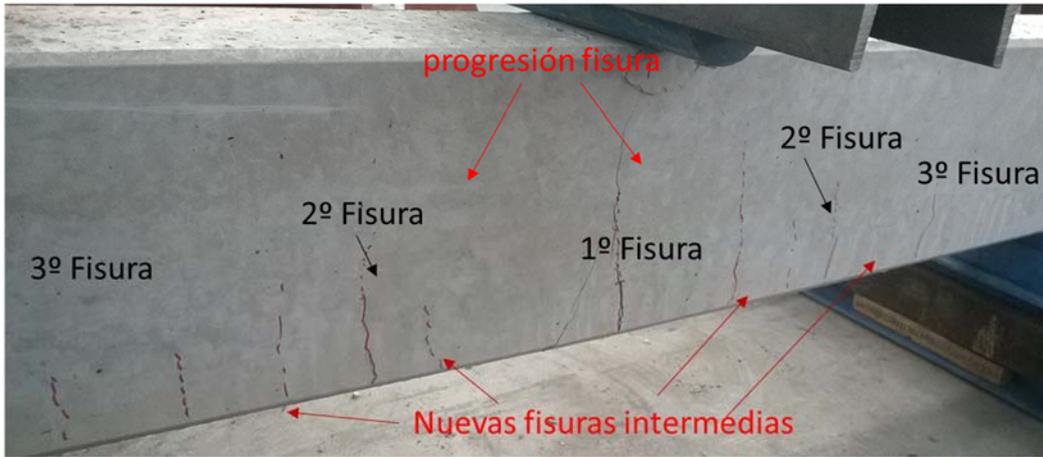


Fig. 238 Estado final de carga después de la rotura donde las deformaciones son mayores y la acción de la carga menor. Aparición de fisuras intermedias.

Las deformaciones instantáneas que se manifestaron a lo largo de todo el proceso son la mostradas en Fig. 239.

Las deformaciones instantáneas resultantes son coherentes y se manifiestan de manera gradual, un aumento a partir de la fisuración provocando una disminución de sección, que la normativa contempla (aplicación fórmula de Branson)

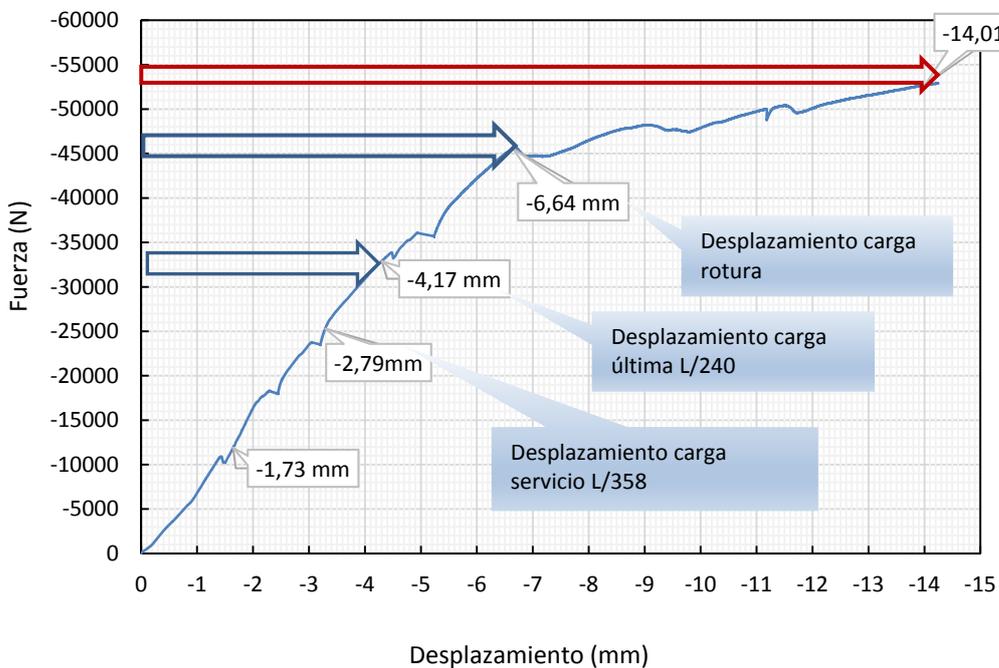


Fig. 239 Gráfica carga desplazamiento de la viga 12x24 con 100% AR.

En la gráfica de la Fig. 240 se muestra el comparativo de la viga 12x24 con 100% de sustitución de AR y la viga de control. En dicha gráfica observamos que el momento de rotura efectivo, de la viga fabricada con árido natural, no está tan

definido por el cambio de pendiente de la curva para la viga fabricada con árido natural, como en la viga fabricada con árido reciclado. La viga con árido natural muestra una mayor capacidad elástica a partir de la carga de rotura, mientras que en la viga con AR la curva se tiende de manera más acusada, motivo por el que la plastificación es mayor.

Las deformaciones mediante carga continua entre la viga fabricada con árido natural y reciclado, para la viga armada fabricada con AR 100% de sustitución, el incremento de flecha instantánea a carga continua fue de un 16,6%, valor algo más bajo que en otros estudios similares⁵⁰⁰ que obtuvieron valores de un 22%.

La viga fabricada con árido natural posee una mejor respuesta frente a la deformación instantánea consecuentemente con su mayor módulo de elasticidad.

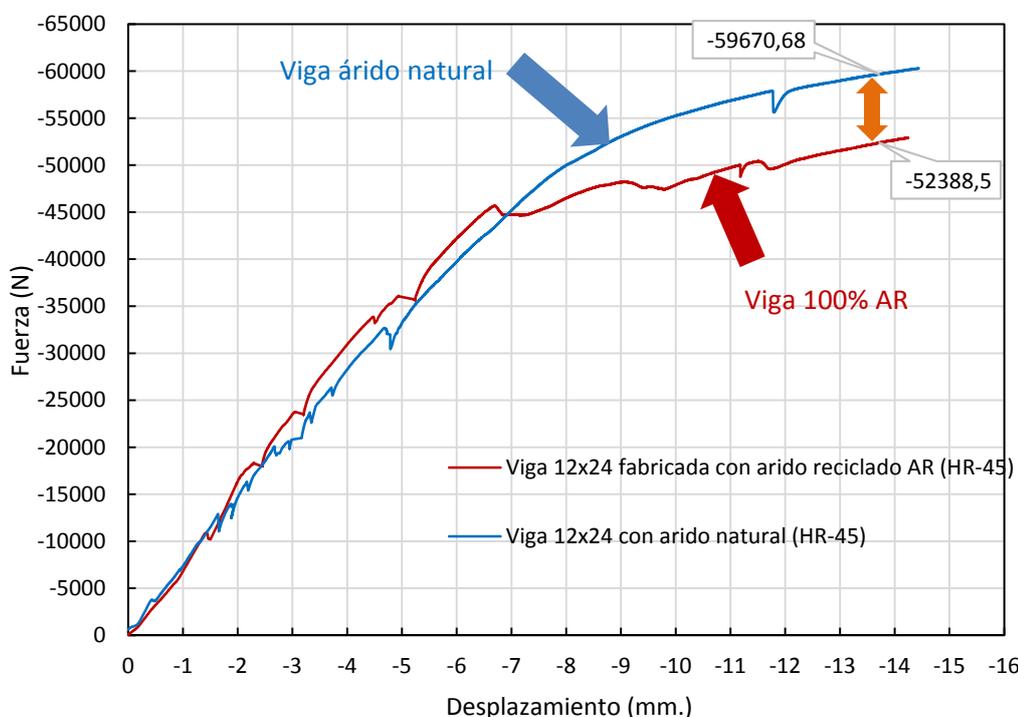


Fig. 240 Viga 12x24 Comparativo del comportamiento de la deformación instantánea entre la viga fabricada con árido reciclado AR y la viga fabricada con natural, ambas de la misma resistencia característica HR-45.

⁵⁰⁰ Pérez Benedicto, J. A. (2011). Estudio experimental sobre propiedades mecánicas del hormigón reciclado con áridos procedentes de la no calidad. Departamento de construcciones Madrid, Universidad Politécnica de Madrid.

5.4.2. Rotura por flexión-cortante.

La viga objeto del experimento tiene una luz/canto de $100/24=4,16>2$, por tanto no cumple la condición de viga corta que es $l/h<2$. En consecuencia el ensayo no se ajustará a flexión pura, presentando un comportamiento mixto flexión-cortante.

Lo mismo que en el caso anterior, se muestra el diagrama fuerza-desplazamiento señalando los diferentes cargos que delimitan los momentos de fisuración, momento de servicio, ultimo y cortante último en la Fig. 241.

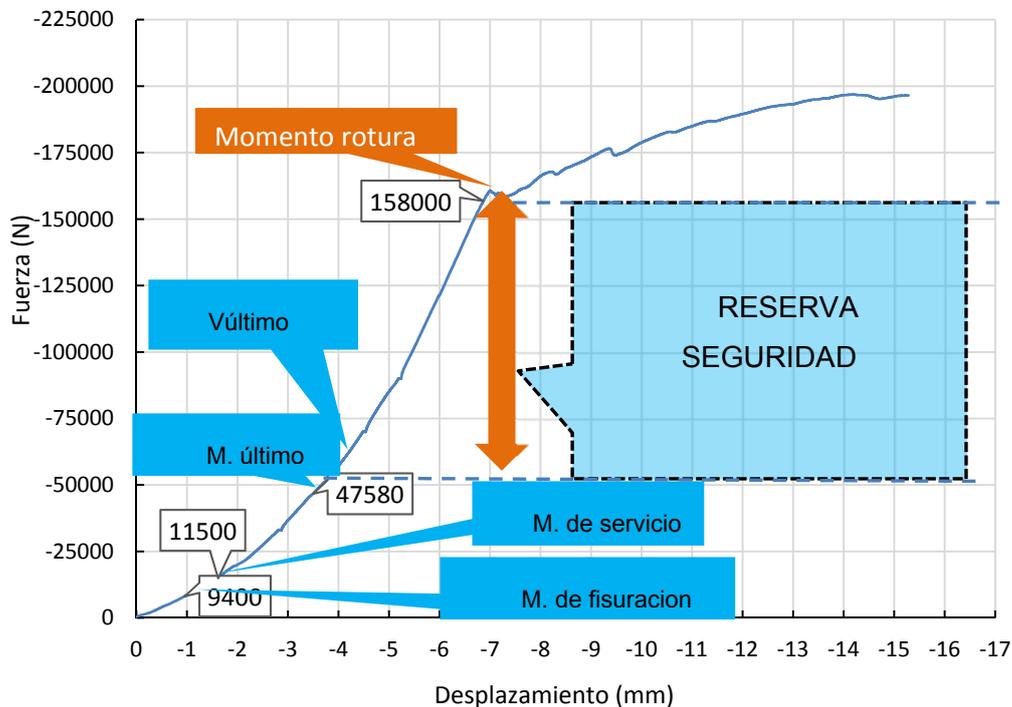


Fig. 241 Escalón de cargas y cargas resultantes momentos último de servicio y fisuración.

En este caso, la reserva de seguridad es mayor (51% mayor) que en el caso anterior:

$$R(\%) = \frac{158000 - 47580}{158000} \times 100 = 69,80\% \quad (90)$$

En la Fig. 242 se muestran las fisuras aparecidas para diferentes estados de cargas intermedios. El reparto de las fisuras, si bien se producen de manera vertical, aparecen algunas inclinadas hacia los apoyos, debido al mecanismo conjunto de flexión y cortante.

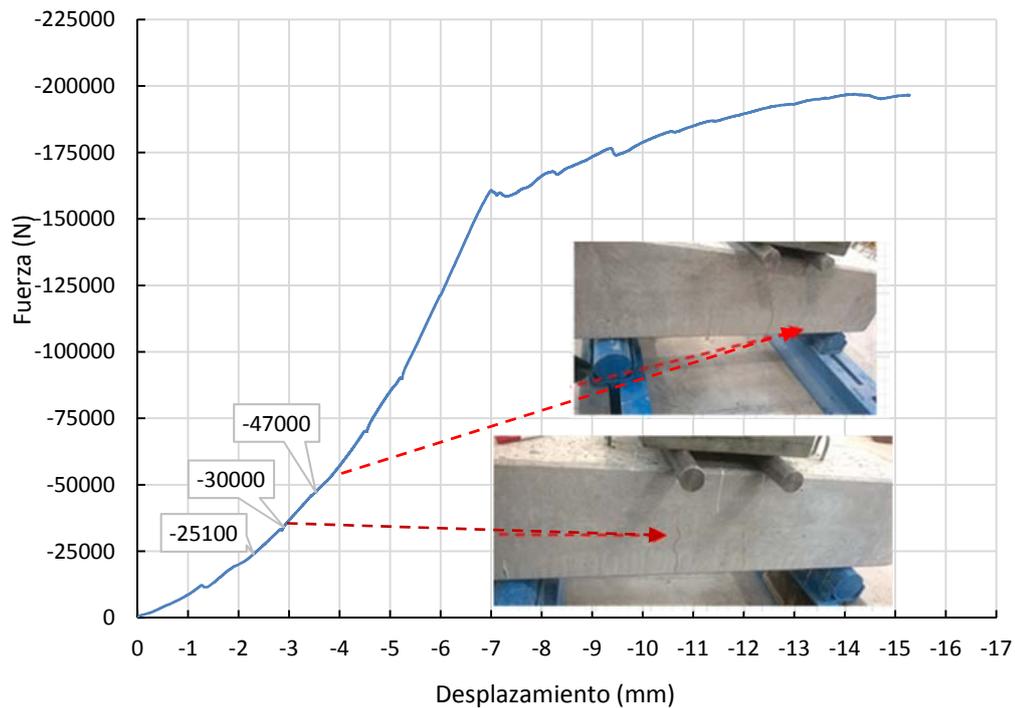


Fig. 242 Geometría de las fisuras a partir de la primera aparecida después de la carga límite del momento de fisuración.

En la Fig. 243 se muestra la inclinación de las fisuras hacia el apoyo que justifica su sollicitación a flexión y cortante.

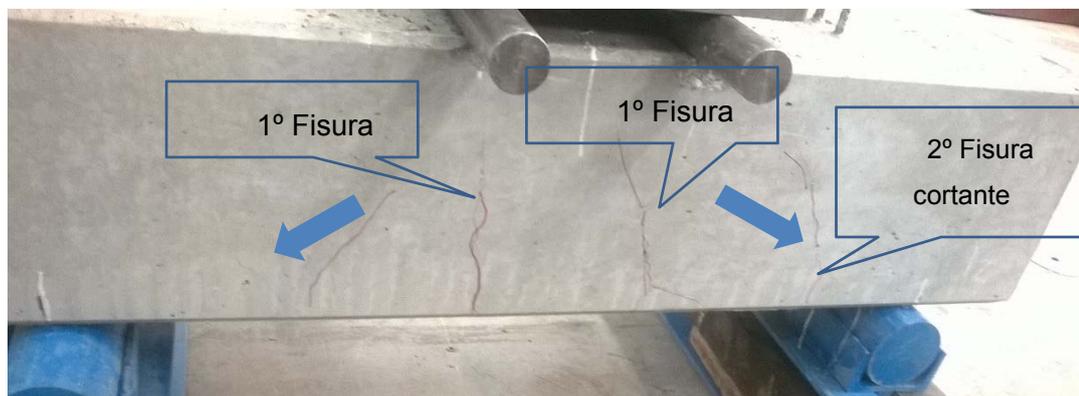


Fig. 243 Aparición de primeras fisuras y progresión fisura cortante dirigida hacia el apoyo.

En la Fig. 244 se incrementa la inclinación de fisuras al apoyo a medida que progresan las fisuras verticales en el centro de vano. La rotura por cortante o flexión y cortante sucede cuando la armadura transversal es insuficiente para soportar el esfuerzo cortante. En este caso el hormigón del cordón no fisurado soporta casi todo el esfuerzo cortante, lo que origina una extensión de la fisura hasta la parte superior de la pieza y el hormigón comprimido fisura por compresión.

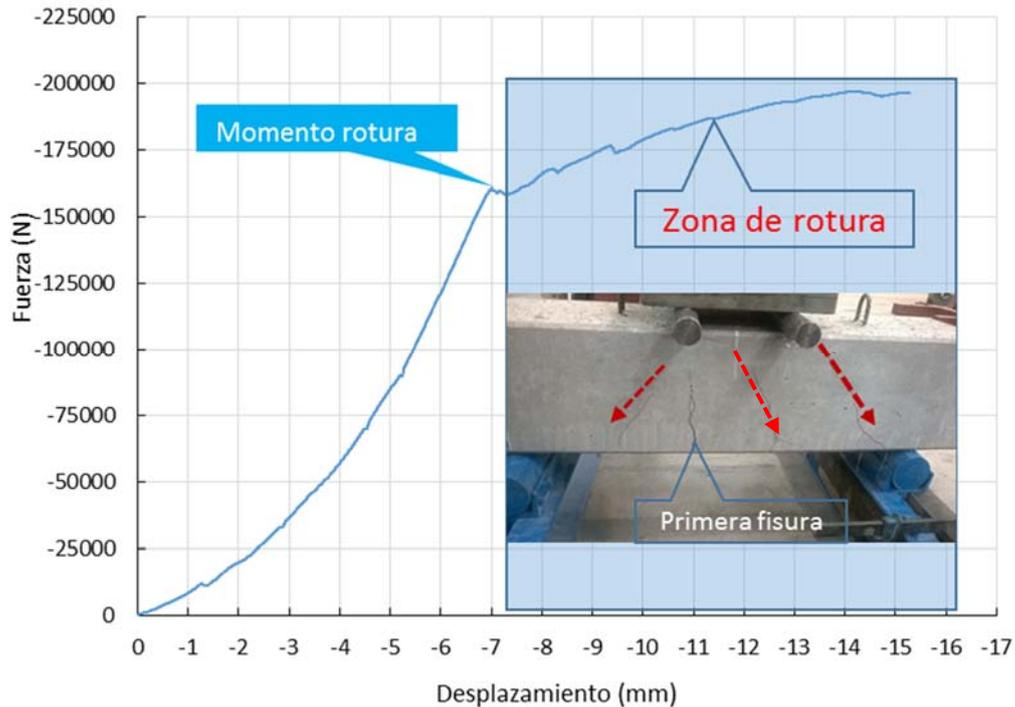


Fig. 244 Intervalo de rotura. Zona de plastificación con aumento de deformaciones y carga constante.

Se muestra claramente el mecanismo flexión-cortante para la viga 24x24 con 100% AR. El comportamiento del hormigón autocompactable, es más deformable que el hormigón convencional, provoca fisuras más anchas y más profundas, llegando a producir el fallo de la viga a flexión⁵⁰¹.

La gráfica de deformaciones instantáneas se refleja en la Fig. 245.

⁵⁰¹ Cruz, C. J. d. I., Turmo, J., Gettu, R., Barragan, B. and Ramos, G. (2009). "Ensayos a cortante de vigas de hormigón estructural autocompactable." Dyna: 35-41.

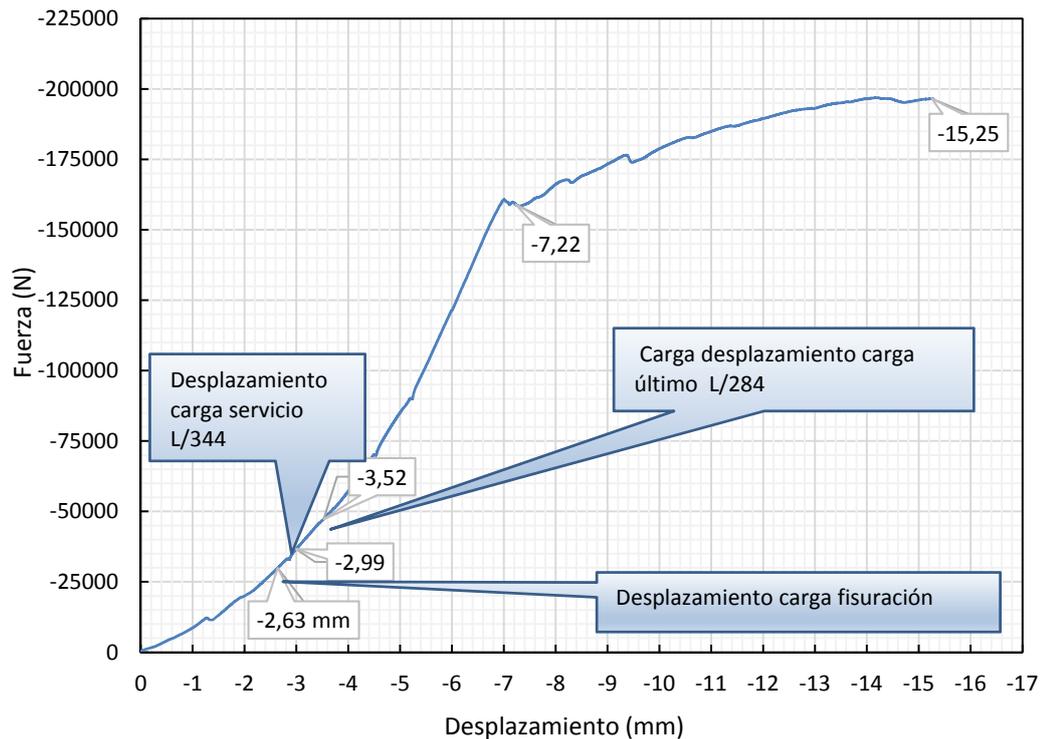


Fig. 245 Gráfica de deformaciones instantáneas de la viga 24x24.

Debido a la mayor rigidez de la viga las deformaciones son menores a las de la viga de sección 12x24.

Comparativos de las vigas de sección 24x24, se exponen en el gráfico de la Fig. 246. Se observa un mejor comportamiento elástico en la viga con árido natural a partir de que la sección está agotada. De forma distinta se comporta la viga con árido reciclado que a partir de la carga de agotamiento presenta un estado plástico que se manifiesta en la gráfica por una mayor inclinación. Para el estado de flexocompresión las deformaciones instantáneas resultantes se muestran en la gráfica carga-deformación para los dos hormigones ejecutados con árido natural y reciclado y son prácticamente paralelas. La respuesta de la gráfica con árido reciclado está por debajo de la del árido natural, lo que responde a una posible fisuración previa que afecta a la sección, además de dar respuesta a un menor módulo de elasticidad (E).

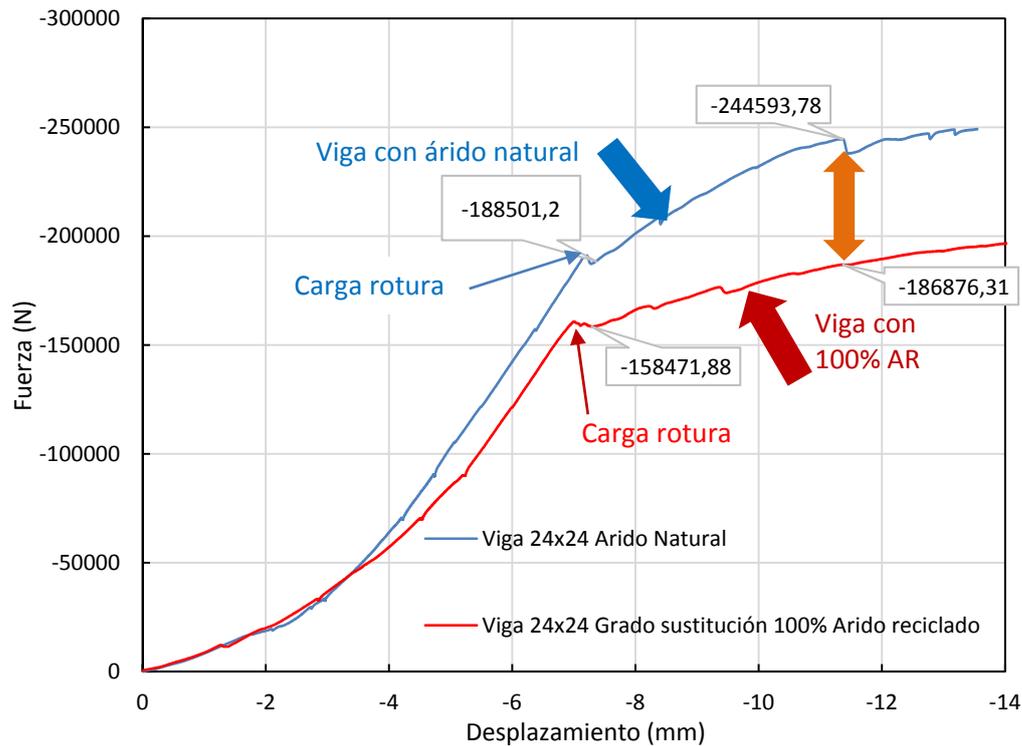


Fig. 246 Viga 24x24 Comparativo entre momentos de rotura de la viga con árido natural y 100% de árido reciclado.

5.4.3. Rotura por esfuerzo cortante

Los resultados del ensayo a cortante se llevaron a cabo sobre una muestra única de viga 12x24 y según el esquema de carga definido en la metodología. Los valores de cortante últimos trasladados a las gráficas resultantes de aplicar la carga continua se especifican en la Fig. 247.

La Fig. 248 muestra el cambio de pendiente y la reserva de seguridad entre el cortante último según el cálculo y el cortante de rotura.

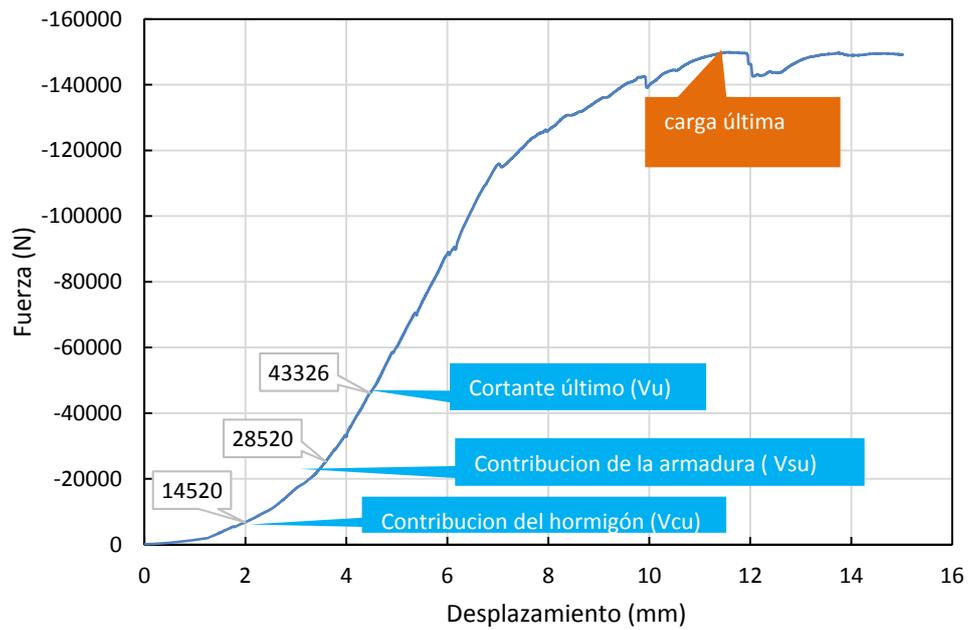


Fig. 247 Diagrama de carga continua y comparativa entre valores teóricos y reales.

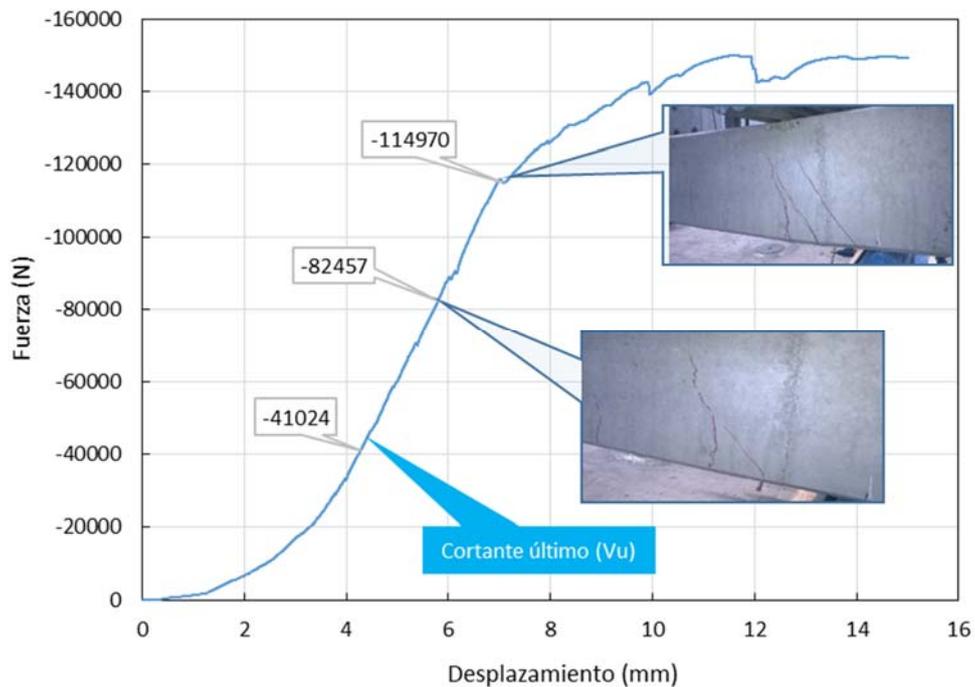


Fig. 248 Gráfica y resultados de la primera fisura y de la progresión de la fisura en estado previo rotura.

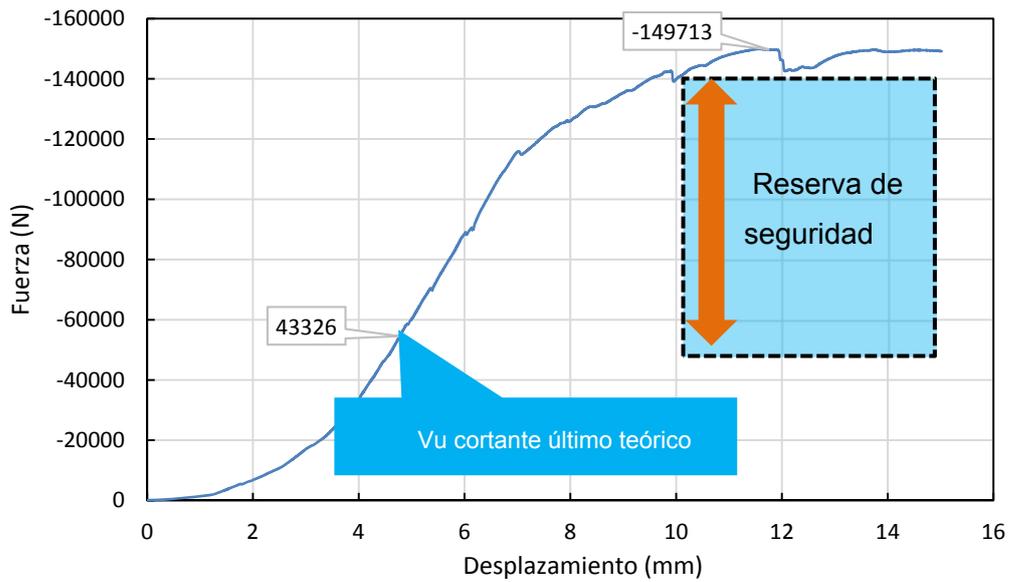


Fig. 249 Reserva de seguridad entre el cortante último y el cortante de rotura real.

La reserva de seguridad obtenida (91), como el caso anterior, entre los valores teóricos últimos y reales es óptima y demuestra la gran capacidad de la viga ejecutada con 100% de AR.

$$R(\%) = \frac{142280 - 43326}{142280} \times 100 = 69,54 \% \quad (91)$$

En la Fig. 250 y Fig. 251 se aprecia las fisuración producida con fisuras inclinadas que van aumentando la pendiente hasta el apoyo.



Fig. 250 Fotos donde se aprecia la fisuración canalizada a la carga al apoyo.

En la Fig. 251 se muestra ampliado el mecanismo de bielas inclinadas.

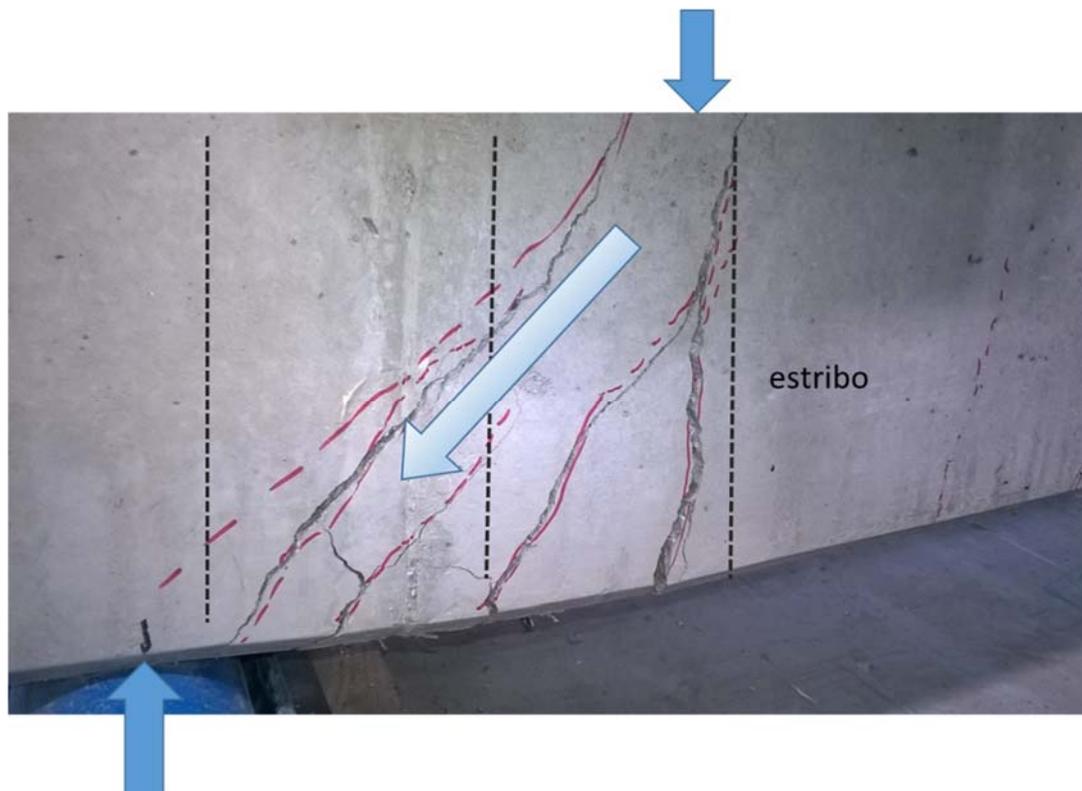


Fig. 251 Mecanismo de bielas de compresión que produce rotura.

Se puede también constatar con la bibliografía⁵⁰², que el hormigón autocompactable es más deformable (comportamiento plástico) que el hormigón convencional. Esta mayor deformabilidad provocó un mayor desarrollo de las fisuras (fisuras más anchas y profundas) durante la realización de los ensayos.

Las deformaciones instantáneas que se producen durante el proceso se adjuntan en la Fig. 252.

⁵⁰² Ibid.

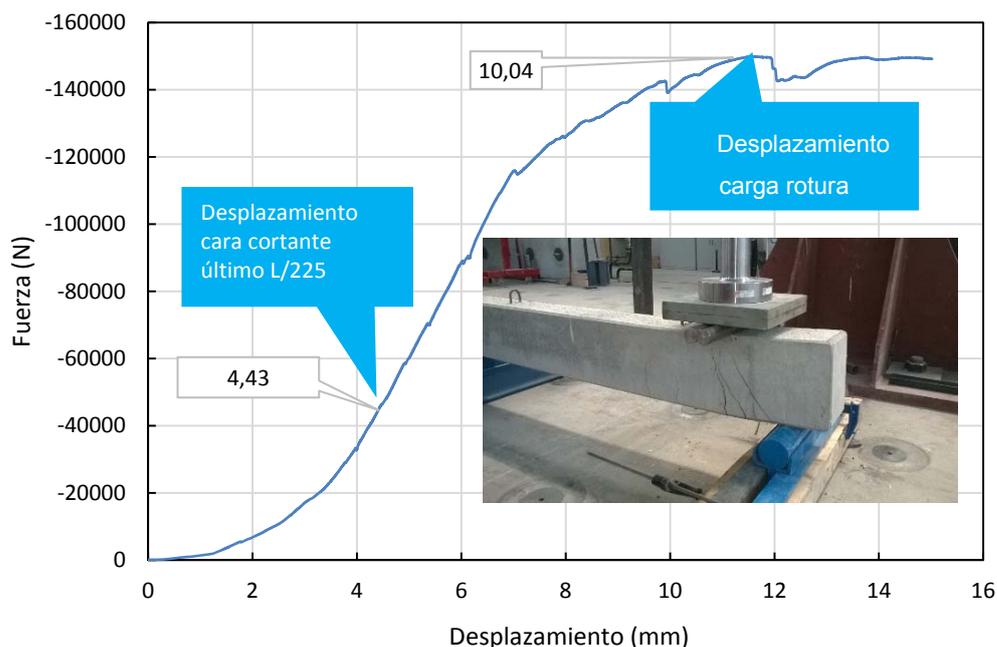


Fig. 252 Gráfica de deformaciones durante el ensayo y valores coincidentes con el cortante de rotura.

5.4.4. Deformación diferida

Las cargas aplicadas según el esquema de cargas expuesta en el apartado 4.3.6.2.3 se especifican en la Tabla 101. En el momento de la entrada en carga, al llenado de los depósitos se produjo una pequeña fisura.

Tabla 101 Cargas constantes aplicadas puntualmente durante el periodo tiempo.

Elemento ensayo	Material	Peso Unidad	Peso puntual (N)
Viga 12x24	Hormigón	720 N/m	1080
HEB-160	Acero	580 N/m	1300
Depósitos Agua (2Ud)	Agua	10000 N	20000
Total			22380

Con estas cargas los resultados de deformación se expresan en la Fig. 253.

Los resultados de la gráfica expresan una deformación instantánea en el momento de la aplicación de la carga que se corresponde con el tramo recto y cuyo valor máximo es de 0,216 mm. La flecha total es la suma de la flecha instantánea más la flecha diferida, en nuestro caso 0,351 mm. La flecha diferida es el resultado de la flecha instantánea multiplicado por un coeficiente ρ que depende de la duración de la carga, cuantía geométrica de la armadura de la sección a compresión.

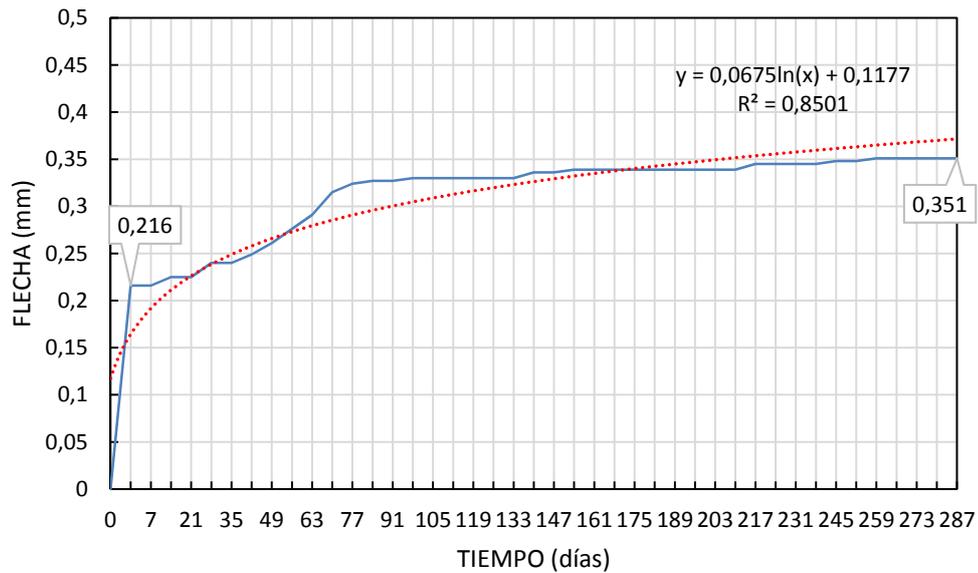


Fig. 253 Resultado de valores de las deformaciones en el tiempo especificado para el hormigón HR-45 con un grado de sustitución de 100% obtenido en la prueba industrial.

Los valores teóricos extraídos de un prontuario informático se detallan en la Fig. 254.

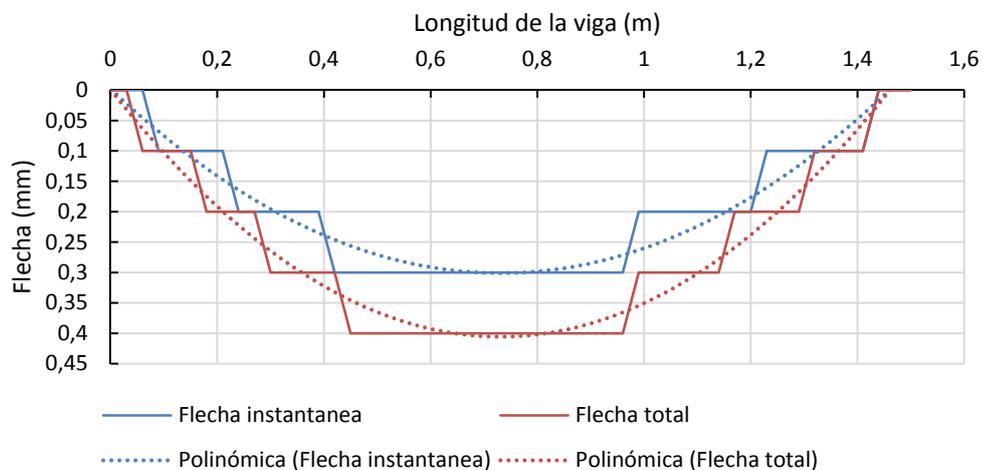


Fig. 254 Resultados teóricos obtenidos de prontuario informático para la edad considerada.

Los valores obtenidos para las cargas referenciadas muestran valores menores que los obtenidos teóricamente para la geometría y cargas consideradas. El valor de 0,251 es menor que el valor de 0,30 obtenido teóricamente. Y el valor de la flecha diferida es de 0,135 menor que 0,2, valor teórico calculado en prontuario.

5.5. ESTUDIO ECONÓMICO

El estudio económico deberá abarcar tanto la parte cuantitativa como la cualitativa del producto, como la aportación a la sostenibilidad por el reciclaje de materiales.

El estudio económico se ha realizado sobre los hormigones con AR prescritos que se han utilizado en esta Tesis.

El precio final del hormigón con AR depende de varios factores: el coste de la materia prima, el coste de la fabricación y el coste de la puesta en obra.

Para la realización del estudio económico, solo se ha tenido en cuenta el coste de los materiales y de su fabricación ya que el coste de la puesta en obra no varía sea un hormigón utilizado habitualmente o un hormigón con AR.

Es habitual en una empresa de prefabricados confeccionar un escandallo para los distintos elementos prefabricados, donde se refleja el coste de los materiales, precios auxiliares y descompuestos teniendo en cuenta los costes indirectos, incluso amortizaciones de medios auxiliares etc.

Los costes para una empresa se componen de costes directos, gastos e indirectos. Los costes directos son aquellos que quedan asumidos en un elemento prefabricado, y están obtenidos por la suma de los costes de todos sus componentes: mano de obra, materiales, maquinaria y gastos auxiliares. Se engloban como gastos auxiliares a aquellos que engloban la totalidad de gastos que no inciden directamente en la fabricación pero si en el total de la empresa (luz, amortizaciones de moldes, etc.). La aplicación de los gastos se puede realizar como un porcentaje sobre el total del producto.

Los costes indirectos son aquellos que no pueden imputarse a un elemento prefabricado concreto, sino al conjunto o parte de obra. Pueden considerarse como gastos indirectos los siguientes: gastos de oficina técnica, comunicaciones, almacenes, vestuarios, personal técnico y administrativo adscrito exclusivamente a la empresa y los imprevistos. Estos costes indirectos se fijan aplicando un porcentaje sobre los costes directos igual para todas las unidades de obra.

La nomenclatura utilizada para definir los diferentes tipos de precios utilizados ha sido la siguiente:

- Precio unitario simple: cada uno de los elementos de mano de obra, materiales, y maquinaria que intervienen en la formación de un elemento complejo o

auxiliar de una unidad de obra. Por ejemplo la tonelada de cemento, la hora de alquiler de una máquina, la hora de peón, etc.

- Precio auxiliar: conjunto de precios unitarios simples que convertidos en un material que se prepara y consume a pie de obra. Por ejemplo el m³ de hormigón.
- Precios descompuestos o unidades de obra: conjunto de precios simples o auxiliares que configuran una unidad de obra realizada por un grupo de especialistas.
- Precio complejo: partida de obra formada por otros precios unitarios, que definen una unidad de obra más amplia que la de una partida y que es realizada por uno o varios grupos de especialistas.

Se ha comenzado obteniendo el precio unitario simple de las materias primas, para luego elaborar los precios auxiliares de cada uno de los hormigones prescritos.

También se ha recabado información de entrada y salida de residuos provenientes de hormigón. Los rendimientos de las maquinas trituradoras, cribadoras y transportes han sido consultados considerando los precios adjuntados reales, para poder valorar el precio real de obtención del AR proveniente de elementos prefabricados

La elaboración de los precios auxiliares se ha ejecutado mediante el programa Menfis, los rendimientos han sido obtenidos de la base de datos de precios de la construcción de Castilla y León.

A parte de los beneficios relativos a la sostenibilidad y contribución al medio ambiente (valoración cualitativa), como toda línea de actuación nueva en una empresa exige de un estudio económico.

5.5.1. Valoración cuantitativa

5.5.1.1. Precios simples unitarios

Los precios simples unitarios se han extraído de los que utilizan y suministran proveedores habituales de este tipo de empresas de prefabricados.

El estudio llevado a cabo supone una serie de precios simples unitarios, que determinen el importe de la obtención del m³ de hormigón ejecutado habitualmente con áridos naturales, y el nuevo hormigón con las sustituciones estudiadas de AR para lo cual se determinará su coste. En la Tabla 102 y Tabla 103 se muestran los precios simples y de mano de obra y auxiliares, utilizados para la elaboración del precio descompuesto de nuestro hormigón.

Tabla 102 Precios simples de materiales.

Ud	Designación	Precio (€)
t	Cemento tipo I-52,5R	100,82
t	Arena 0/2	13,90
t	Árido grueso 2/12,5	18,00
t	Filler calizo	29,00
kg	Superfluidificantes 20HE	2,00
kg	Aditivo Syca 5920 reductor agua	2,00
m ³	Litros de agua	0,36

Tabla 103 Precio mano de obra y medios auxiliares.

Ud	Designación	Precio
h	Peón ordinario según convenio empresas derivados Cemento	12,95
h	Oficial 1º	18,30
€/h	Central hormigonado	1,50€/h

A continuación, una estimación de coste de la obtención del árido reciclado.

Lo primero es la obtención de tasas de vertido de diferentes centrales de tratamiento y de tasas de salida, Tabla 104.

Tabla 104 Diferentes centrales de tratamiento y tipos de árido a suministrar €/t.

Planta	Entrada residuos (€/t)			Salida residuos (€/t)			
	ARH>40	ARH<40	Áridos mixtos	Árido 0-8	ARH 8-20 mm	ARH 10-40 mm	ARM 8-20 mm
Estejosan ⁵⁰³	3,5	6,2	5,5	1,75	6,25		2,7
Navalcarnero ⁵⁰⁴		4	8				2
Ecoinertes ⁵⁰⁵		5	5			3,5	
Cedex Materiales ⁵⁰⁶		5	10		7	4	3,5
		6,70				6	4
Inteca-Altocarrón ⁵⁰⁷		6,20	18,5				4
Iglecar ⁵⁰⁸		3,70	5,5			5	3,5

Destacar que la Empresa “Estejosan” es la única que se ha encontrado en Castilla y León que oferte áridos provenientes del hormigón.

⁵⁰³ Empresa Central de residuos Estejosan SL Toro. Zamora.

⁵⁰⁴ Empresa UTE planta Navalcarnero. Carretera M-600 KM.45.700 (28600) Navalcarnero.

⁵⁰⁵ Empresa Ecoinerte Carretera antigua de Málaga, 140 Granada (18150).

⁵⁰⁶ CEDEX Ficha Técnica Residuos de construcción y demolición.

⁵⁰⁷ Empresa Inteca Alto Carrón. Polígono 504 parcela 5 Villanueva de Guardo Palencia.

⁵⁰⁸ Empresa Grupo Iglecar. Calle valdebezana Polígono Gamonal Villimar Burgos.

En la Tabla 105 se muestra el proceso de obtención a partir de varias piezas prefabricadas, para la obtención de árido reciclado utilizable según el proceso mostrado anteriormente.

Tabla 105 Estimación del precio unitario sobre una muestra de machaqueo realizada en una central de tratamiento de residuos y de diversos elementos prefabricados (pilares, vigas etc.)

Ud	Designación	Precio	Cantidad	Importe (€)
h	Horas pinza hidráulica	45	1	45
€/t	Trituración primaria mandíbulas tamaño 0/100 (Rendimiento 50-80 t/h)	0,5	10	5
€/t	Machacadora de impactos 0/25 mm (Rendimiento estimado 30 t/h)	2	10	20
€/t	Cribado tromel o cribadora	4	10	40
€/t	Transporte a vertedero (50 km)	10	10	100
€/t	Tasa vertido	6,2	10	-62
kg	Acero ferralla residuo (cuantía media 15 kg/ml)	0,25	300	-75
Total				73
Rendimiento unitario (65%) (*)				11,73 €/t

(*) Rendimiento considerado de los estudios.

Otra posibilidad, Tabla 106, es el desplazamiento de una trituradora móvil con cribador de varios tamaños hasta pie de fábrica para lo cual deberían considerarse los costes de alquiler de la maquinaria.

Tabla 106 Estimación del precio de machaqueo y cribado en fábrica.

Ud	Designación	Precio	Cantidad	Total (€)
h	Horas pinza hidráulica	45	1	45
€/t	Machacadora móvil 0/25 mm (Rendimiento 30 t/h)	4	10	40
€/t	Cribado Tromel o cribadora (0/5)-(5/20)	12	10	20
€/t	Tasa vertido	6,2	10	-62
kg	Acero ferralla residuo (Cuantía media 15 kg/ml)	0,25	300	-75
Total				68
Rendimiento unitario (65%)*				10,45 €/t

(*) Rendimiento considerado de los estudios.

Los precios obtenidos son relativamente mayores que los de venta de salida de las centrales de tratamiento expuestos en la Tabla 104, si bien a los obtenidos por las centrales de residuos se les debe incorporar el cribado al tamaño 4/12,5 necesario para incorporarlo al proceso.

5.5.1.2. Precios descompuestos de los hormigones utilizados

Los precios auxiliares del hormigón con las dosificaciones empleadas se resumen para la dosificación $w/c=0,35$ correspondiente a f_{ck} 45 MPa, Tabla 107.

Tabla 107 Precio descompuesto correspondiente a 1 m³ de hormigón con dosificación $w/c=0,35$ y $f_{ck}=45$ MPa Hormigón de referencia.

Ud	Designación	Precio	Cantidad	Total (€/m ³)
h	Horas de Peón	16,8	0,834	14,01
t	Cemento I-52,5	100,82	0,32	32,26
t	Arena silíceo 0/2	13,9	0,65	9,03
t	Árido grueso silíceo 2/12,5	18	1,15	20,70
t	Filler calizo	29	0,28	8,12
kg	Aditivo Sika Superfluidificantes 20HE	2	0,605	1,21
kg	Aditivo Sika 5920	2	1,5	3
l	Agua	1,27	0,11	0,13
h	Hormigonera de capacidad 2 m ³	3,89	0,55	2,13
Total (€/m³)				90,61

Si la sustitución de árido natural por AR, es de un 20%, el precio descompuesto se refleja en la Tabla 108.

Tabla 108 Precio descompuesto correspondiente a 1m³ de hormigón con dosificación $w/c=0,35$ y $f_{ck}=45$ MPa y sustitución de un 20% de AR.

Ud	Designación	Precio	Cantidad	Total (€/m ³)
h	Horas de Peón	16,8	0,834	14,01
t	Cemento I-52,5	100,82	0,32	32,26
t	Arena silíceo 0/2	13,9	0,65	9,03
t	Árido grueso silíceo 2/12,5	18	0,86	15,48
t	AR árido reciclado procedente prefabricados	11,23	0,29	3,26
kg	Filler calizo	29	0,28	8,12
kg	Aditivo Sika Superfluidificante 20HE	2	0,605	1,21
kg	Aditivo Sika 5920 reductor agua	2	1,5	3
l	Agua	1,27	0,11	0,13
h	Hormigonera capacidad 2 m ³	3,89	0,55	2,13
Total (€/m³)				88,65

Si la sustitución del árido grueso es de un 100%, la diferencia es más apreciable, teniendo en cuenta una mayor proporción de aditivo Tabla 109.

Tabla 109 Precio descompuesto correspondiente a 1m^3 de hormigón con dosificación $w/c=0,35$ y $f_{ck}=45\text{ MPa}$ y sustitución de un 100% de AR.

Ud	Designación	Precio	Cantidad	Total (€/m ³)
h	Horas de Peón	16,8	0,834	14,01
t	Cemento I-52,5	100,82	0,32	32,26
t	Arena 0/2	13,9	0,72	10,01
t	Árido grueso 2/12,5	18	0	0
t	AR árido reciclado procedente prefabricados	11,23	1,05	11,79
kg	Filler calizo	29	0,28	8,12
kg	Aditivo Supefluificante 20HE	2	0,802	1,70
kg	Aditivo Sika 5920 reductor agua	2	2,05	4,10
l	Agua	1,27	0,11	0,13
h	Hormigonera capacidad 2 m ³	3,89	0,55	2,13
Total (€/m³)				82,65

Por lo tanto se puede concluir que la sustitución de un 20%, 50% y 100% supone un ahorro de coste de 2,22%, 4,5% y de un 6,7% frente al hormigón de referencia.

5.5.2. Valoración cualitativa

El empleo de residuos en la obtención de nuevos materiales incorporándoles al proceso constructivo, no solo debe analizarse desde el punto de vista cuantitativo, sino también cualitativo considerando una orientación a sistemas de producción sostenibles y respetuosos con el medio ambiente.

Las razones que justifican la reutilización de elementos prefabricados, como sustitución de áridos reciclados en nuevos hormigones son las siguientes:

- *Los residuos no se depositarán en vertedero, con lo que existirá un ahorro importante en recursos destinados al transporte, así como en la tasa o canon de vertido.*
- *El impacto ambiental y paisajístico que se genera en los entornos de producción son evitados con esta forma de producción.*
- *Por otro lado, al disminuir la extracción de los áridos naturales, se reduciría la problemática económica y ambiental creciente debido tanto al progresivo agotamiento de los recursos naturales obtenidos en las canteras, como por la aplicación de normativas cada vez más exigentes por parte de las Administraciones Públicas.*

5.6. CONCLUSIONES CAPITULO 5

5.6.1. Conclusiones relativas a la prueba industrial

La prueba industrial realizada corrobora la idoneidad de los hormigones estudiados, con la máxima sustitución de AR, para su empleo en prefabricación.

La reserva de seguridad y coeficiente de aviso garantizan valores altos de confianza para las vigas con árido reciclado

El comportamiento frente a las deformación bajo carga continua resultan valores consecuentes en comparación con el hormigón de control, sensiblemente mayores, debido a su menor módulo de elasticidad.

El ensayo de rotura a esfuerzo último frente flexión-cortante demuestra un comportamiento dúctil habitual para un hormigón autocompactable, comportándose el hormigón fabricado con árido reciclado un comportamiento más plástico, que el hormigón de control, predominando la rotura por flexión.

La capacidad de la viga frente a carga continua supera los límites teóricos de cortante último por contribución del hormigón y de la armadura apreciándose el mecanismo de fisuración consecuente a través de bielas dirigidas de la carga al apoyo.

La influencia del AR en el ensayo a deformación diferida responde adecuadamente frente a los parámetros teóricos calculados.

5.6.2. Conclusiones relativas al estudio económico

El estudio económico responde y completa cuantitativamente con un precio óptimo mejorado del importe del metro cubico de hormigón con la incorporación de AR (precio descompuesto) utilizando cualquier grado de sustitución, respecto al hormigón de control.

Pero no solo debe analizarse desde el punto de vista cuantitativo, considerando el precio final del producto, sino también desde una perspectiva cualitativa, considerando una nueva filosofía productiva de bienes y servicios orientada a sistemas de producción sostenibles y respetuosos con el medio ambiente.

*CONCLUSIONES Y NUEVAS
LINEAS INVESTIGACION*

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

6.1. CONCLUSIONES FINALES

Es por tanto, el conjugar, tecnología del hormigón, calidad y criterios medioambientales, incorporando el nuevo material reciclado a los proceso de fabricación para la obtención de nuevos elementos prefabricados, con las garantías suficientes para su incorporación en el mercado, son los objetivos conseguidos en el presente trabajo.

La elaboración de hormigones autocompactantes con áridos reciclados es perfectamente viable y oportuno, la tecnología de fabricación de estos hormigones exige el empleo de aditivos de última generación, como superplastificantes y reductores de agua simultáneamente.

Dado el buen comportamiento mecánicos de los hormigones con áridos reciclado y que los módulos de elasticidad disminuyen a medida que aumentamos la proporción de árido reciclado, sería más adecuado su aplicación en elementos que se les solicite a compresión como pilares, paneles prefabricados, ménsulas, que en elemento en que predomine más las sollicitaciones normales (flexión), o utilizando en esto últimos, menor proporción de árido reciclado.

Los requisitos y exigencias del nuevo hormigón se extienden, con el comportamiento frente a durabilidad, ya que los elementos prefabricados pueden ser destinados a todo tipo de ambientes, incluso agresivos. La Normativa establece un estado límite de durabilidad con el fin de asegurar la vida útil preceptiva de los elementos estructurales.

Evidentemente ha sido preciso estudiar minuciosamente todos los factores presentes en el proceso, para conseguir que las propiedades afectadas lo fueran en porcentajes muy reducidos, de forma que la influencia en los resultados fuese casi despreciable, como puede comprobarse en la comparación con los hormigones de control y con los datos obtenidos en la prueba industrial.

El presente estudio concluye el buen comportamiento tecnológico de los hormigones estudiados a través de sus propiedades mecánicas y durabilidad. También la aplicación directa a un proceso industrial en el que confluyen las ventajas de la construcción industrializada, calidad y viabilidad económica. Y además atiende

a los parámetros de sostenibilidad necesarios, complementando a los sistemas de gestión medioambiental que toda empresa competitiva ha de poseer.

La conclusión general es que el presente estudio, demuestra la viabilidad de hormigones de altas resistencias y prestaciones, con diferentes grados de sustitución resultando satisfactorias incluso con sustitución del 100%.

6.2. NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACION

Las nuevas líneas de investigación derivadas del presente trabajo de investigación pueden ser:

El estudio llevado a cabo con el árido procedente de los propios rechazos de fabricación de elementos prefabricados puede ampliarse a árido reciclado procedente de otras fuentes ya sea por entrada en la propia central de residuos o por aprovechamiento de su propia central de residuos y estudiar la graduación de la mezcla de ambos.

La incorporación de una proporción mayor de árido reciclado en aprovechamiento su fracción fina (tamaño 0/4 mm) puede ser compatible y adecuada, atendiendo a estudios referenciados en el estado del arte.

El ampliar la prueba industrial a elementos prefabricados pretensados completaría el buen comportamiento frente elementos prefabricados armados a flexión. Así mismo el ampliar la prueba industrial para analizar el comportamiento de elementos a compresión como pilares, completaría el estudio adecuadamente.

El empleo de áridos reciclados en elementos prefabricados elaborados con máquinas vibrocompactadoras para elementos como placas alveolares.

Dado que la retracción posee valores algo más elevado en los hormigones autocompactables con árido reciclado, la ampliación del presente estudio incorporando fibras, estimamos que mejoraría todavía más las prestaciones en elementos prefabricados superficiales como paneles de fachada y además evitaría las mallas que habitualmente se disponen a tal efecto.

CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA

A continuación se especifican todas las referencias a pie de página reflejadas a lo largo de la presente Tesis ordenadas por orden alfabético de autores para su mejor localización.

ACI-201-SR-05 (2008). Guide to Durable Concrete. A. c. Institute. Michigan.

ACI-318-SR-05 (2002). Structural Concrete. A. c. Institute. Michigan.

ACHE (2006). Comisión 2 Grupo de trabajo 2/5. Utilización del árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural. Madrid, ACHE: Asociación Científico Técnica del Hormigón Estructural. Utilización del árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural.

Afnor (1992-2010). Encyclopedy du Batimant. Paris.

Agrela, F., Sánchez, M., Ayuso, J., Gerales, V. and Jiménez, J. (2011). "Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete." *Construccion and Building Material* **25**: 3950-3955.

Ajdkiewicz, A. and Kliszczewicz, A. (2002). "Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC." *Cement & Concrete Composites* **24**(2): 269-279.

Ajdkiewicz, A. and Kliszczewicz, A. (2007). "Comparative test of beams and columns made of recycled aggregates concrete and natural aggregate concrete." *Journal of avance concrete technology* **5**: 259.

Al-Assadi, G., Casati, M. J., Fernández, J. and Gálvez, J. C. (2011). "Effect of the curing conditions of concrete on the behaviour under freeze-thaw cycles." *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* **34**(7): 461-469.

Alaejos, M. P. and Calvo, B. (2010). "Construccion sostenible, primeras experiencias en España." Ministerio de Fomento **Centro de Estudios y Experimentación obra pública**.

Alaejos, P., Domingo, A., Lázaro, C. and Sanchez, M. (2008). Puente reciclado sobre el río Turia en Manises (Valencia). III Congreso de Puentes y Estructuras de Edificación. Zaragoza. Asociación Científico-Técnica del hormigón.

Alaejos, P., Sánchez, M., Martínez, F. and Gonzalez, B. (2011). Estudio Prenormativo sobre la utilización de los RCD's en hormigón reciclado de aplicacion estructural (proyecto RECNHOR) y reciclado de los RCDs como áridos de hormigones estructurales (Proyecto CLEAM). IECA

ANDECE Asociación de fabricantes de derivados del cemento.

Andrea, V. (2012). Durabilidad en hormigones armados con árido reciclado. Una evaluación de la corrosión en ambiente marino. Tesis. Valencia, Universida Politecnica Valencia: 359.

Arredondo, F. (1977). Dosificación de Hormigón. Manuales y Normas del Instituto Eduardo Torroja de la construcción y del cemento. Madrid.

ASTM-33-08 (2008). Standar specification for concrete aggregates. S. Coshohoken. USA.

ASTM-C192 (2006). Práctica Normalizada para Preparación y Curado de Especímenes de Concreto para Ensayo en Laboratorio.

ASTM-C642 (2006). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.

Barbudo, A., de Brito, J., Evangelista, L., Bravo, M. and Agrela, F. (2013). "Influence of water-reducing admixtures on the mechanical performance of recycled concrete." *Journal of Cleaner Production* **59**: 93-98.

Barra, M. (1996). Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón estructural. Departamento de construcciones. , Universidad Politécnica Cataluña.

Beltrán, M. G., Agrela, F., Barbudo, A., Ayuso, J. and Ramírez, A. (2014). "Mechanical and durability properties of concretes manufactured with biomass bottom ash and recycled coarse aggregates." *Construccion and Building Material* **72**: 231-238.

Bermejo, E., J. Galvez and Fernandez Cánovas, M. (2010). Retracción y fluencia de hormigón autocompactante de resistencia moderada, 2º Congreso Iberico sobre Hormigón Autocompactante. Guimaraes

Bermejo, E., Moragues, A., Galvez, L. and Fernández Canovas, F. (2008). "Permeabilidad y porosidad en hormigones autocompactantes." *Anales de la mecánica de la fractura* **2**(25).

BOE-A-2009-3242 (2009). "Plan Nacional integrado de residuos para el Periodo 2008-2015".

Bogas, J. A. and Gomes, M. G. (2014). "Capillary absorption of structural light aggregate concrete." *Materials and structures*: DOI 10.1671/s 11527-11014-10364-x.

BPCA (2013). *Precast Sustainability Strategy and Charter*. British Precast Concrete Association.

Bravo, M., De Brito, J., Pontes, J. and Evangelista, L. (2015). "Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants." *Construction and Building Materials* **77**: 357-369.

Bravo, M., De Brito, J., Pontes, J. and Evangelista, L. (2015). "Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants." *Journal of Cleaner Production* **99**: 59-74.

BS-8500-2 (2002). "Concrete complementary British Standard to BS EN 206-1. Part 2: Specification for constituent materials and concrete."

Buck, A. (1973). "Recycled concrete." *Highway Research Record* **430**: 1-8.

Bustillo, M. (2010). *Manual de RCD y áridos reciclados*. Madrid.

Buyle-Bodin, F. H. R. (2002). "Influence of Industrially Produced Recycled Aggregate Concrete." *Materiales and Structures* **35**(8): 504-509.

Cartuxo, F., De Brito, J., Evangelista, L., Jiménez, J. R. and Ledesma, E. F. (2015). "Rheological behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates - Influence of the superplasticizer." *Construction and Building Materials* **89**: 36-47.

CEB (1998). *Comite Euro-International du Béton. Strategies for testing and Assessments of concrete structures affected by reinforcement corrosion*. C. E.-I. d. Beton. Laussane (Suiza), Bulletin 243.

CEDEX Ficha Técnica Residuos de construcción y demolición.

CEDEX (2008). *Catálogo actualizado de residuos utilizables en la construcción*, Ministerio de Fomento.

CEDEX (2009). *Reciclados de RCD's como áridos de hormigones no estructurales, para el proyecto CENIT CLEAM*, Ministerio de Fomento.

Collins, R. J. (1998). "BRE Digest 433 Recycled Aggregates."

Corinaldesi, V. (2010). "Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates." *Construction and Building Material* **51**: 1120-1130.

Corinaldesi, V. and Moriconi, G. (2004). "Influence of minerals additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete." *Construction and Building Material* **23**: 2869-2873.

Corinaldesi, V. and Moriconi, G. (2011). "The role of industrial by-products in self-compacting concrete." *Construction and Building Materials* **25**(8): 3181-3186.

Corres, H., Perz, A. and Martinez, J. I. (2008). *Prontuario informático del hormigón estructural 3.1 EHE-08 IECA*. Universidad Politécnica de Madrid.

Cruz, C. J. d. I., Turmo, J., Gettu, R., Barragan, B. and Ramos, G. (2009). "Ensayos a cortante de vigas de hormigón estructural autocompactable." *Dyna*: 35-41.

Chakradhara, M., Bhattachayy, S. K. and Barai, S. V. (2011). "Behaviour of Recycled Aggregate concrete under drop weight impact load." *Construction and Building Material* **25**(1): 69-80.

Chen, S.-H., Wang, H.-Y. and Zhou, J.-W. (2013). "Investigating the properties of lightweight concrete containing high contents of recycled green building materials." *Construction and Building Materials* **48**: 98-103.

Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S. and 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.

De Brito, J. (2010). "Abrasion resistance of concrete made with recycled aggregates." *Construction and Building Material* **3**(1): 58-64.

Dhir, R. K., Limbchiya, M. C. and Leelawat, T. (1999). "Suitability of recycled concrete aggregate for use in BS 5328 designated mixes." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings* **134**(3): 257-274.

Dhir, R. K. and Limbchiya (1999). "Suitable of recycled concrete aggregate for use BS 5328 Designated Mixes." *Structures and Building*.

DIN4226-1 (2000). Concrete aggregate.

DIN-1045-1 (2008). Concrete, reinforced concrete and prestressed concrete structures. Part 1 Design and Construction. B. V. Gmbh. Berlin.

Domingo-Cabo, A., Lázaro, C., Gayarre, F., Serrano, M., Serna, P. and Castaño-Tabares (2009). "Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete." *Construction and Building Material* **23**: 2545-2553.

Domingo, A., Lázaro, C., Gayarre, F. and Serrano, M. (2009). "Long term deformations by creep and shrinkage in recycled aggregate concrete." *Materiales and Structures* **47**(8): 1147-1160.

Duan, Z. H. and Poon, C. S. (2014). "Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars." *Materials and Design* **58**: 19-29.

ECOARIDOS (2005). Proyecto ecoaridos Junta Castilla y León.

EHE-08 (2008). Instrucción Española del Hormigón Estructural. Madrid, Ministerio de Fomento.

Empresa Central de residuos Estejosa SL Toro. Zamora.

Empresa Ecoinerte Carretera antigua de Málaga, 140 Granada (18150).

Empresa Grupo Iglecar. Calle valdebezana Polígono Gamonal Villimar Burgos.

Empresa Inteca Alto Carrión. Polígono 504 parcela 5 Villanueva de Guardo Palencia.

Empresa UTE planta Navalcarnero. Carretera M-600 KM.45.700 (28600) Navalcarnero.

EN-12350-8 (2012). Ensayos de hormigón fresco. Parte 1 Toma de muestras

EN-12390-2 (2009). Ensayos del hormigón endurecido parte 2 Fabricación y curado de las probetas para ensayos de resistencia.

EN-12504-4 (2004). Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos.

EN-127339 (2007). Propiedades y condiciones de suministro y recepción de baldosas de hormigón.

Etxeberria, M., Ainchil, J., Pérez, M. E. and Alain, G. (2013). "Use of recycled fine aggregates for Control Low Strength Materials (CLSMs) production." *Construction and Building Material* **Nº 44**: 142-148.

Etxeberria, M. and Vázquez, E. (2010). "Alkali silica reaction in concrete induced by mortar adhered to recycled aggregate." *Materiales de Construcción* **60**(297): 47-58.

Etxeberria, M., Vázquez, E., Mari, A. and Barra, M. (2007). "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete." *Cement & Concrete Composites* **Nº 5**(Vol 37): 735-742.

Evangelista, L. and de Brito, J. (2010). "Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates." *Cement & Concrete Composites* **32**(1): 9-14.

Evangelista, L. and de Brito, J. (2014). "Concrete with fine recycled aggregates: a review." *European Journal of Environmental and Civil Engineering* **18**(2): 129-172.

Faleschini, F., Jiménez, C., Barra, M., Aponte, D., Vázquez, E. and Pellegrino, C. (2014). "Rheology of fresh concretes with recycled aggregates." *Construction and Building Material* **73**: 417-424.

Farhad, A. and Shami, N. (2011). "Shrinkage behavior of self-compacting concrete." *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A* **13**(6): 407-419.

Fernández Cánovas, M. (2006). Hormigón Armado, Madrid.

Fick (Alemania 1829). Adolf Eugen Fick. Ley de difusión.

Foster, S. (1986). "Recycled concrete aggregate." *Concrete International*: 34-40.

Fuji, T. (1988). Strengths and Drying Shrinkage Behavior of Concrete Using Concrete Crushed Aggregate. Demolition and Reuse of Concrete Masonry. P. o. t. s. I. R. S. Y. Kasai. Reuse of Demolition Waste. **32**: 660-669.

G.E.H.O. (Octubre 1993). "Durabilidad de estructuras de hormigón. Guía de Diseño del CEB." Boletín N°12 Del GEOH.

Gaedicke, C., Marín, A. and Miankodila, F. (2014). "Assessing the abrasion resistance of cores in virgin and recycled aggregate pervious concrete." *Construction and Building Materials* **68**: 701-708.

Galán, I. (2011). Carbonatación del hormigón combinación del CO₂ con las fase hidratadas del cemento y frente de cambio de pH. Facultad Ciencias Químicas. Madrid, Universidad Complutense.

García-Lodeiro, I., Palomo, J. G., Palomo, A. and Fernández Jiménez, A. (2014). "A statistical approach to the study of concrete carbonation." *Materiales de Construcción* **64**(313).

GEAR (2010). "Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición." Asociación Española de Gestores de Residuos de la Construcción.

Gómez-Soberón, J. M. (2002). "Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate, an experimental study." *Cement & Concrete Research* **32**: 1301-1311.

González-Corominas and Etxeberria, M. (2014). "Properties of high performance concrete made with recycled fine ceramic and coarse mixed aggregates." *Construction and Building Materials* **68**: 618-626.

González-Taboada, I., González-Fonteboa, B., Martínez-Abella, F. and Pérez-Ordóñez, J. L. (2016). "Prediction of the mechanical properties of structural recycled concrete using multivariable regression and genetic programming." *Construction and Building Materials* **106**: 480-499.

González, A. and Etxeberria, M. (2014). "Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete." *Construction and Building Materials* **52**: 227-235.

González Fonteboa, B. (2002). Hormigones con áridos reciclados procedentes de demoliciones: Dosificaciones, propiedades mecánicas y comportamiento estructural a cortante. Tesis. E.T.S.I Caminos Canales y Puertos, A Coruña.

González Fonteboa, B. and Abella, M. (2008). "Concretes with aggregates from demolition waste a silica fume: materials and mechanicals properties." *Building and Environment* **43**(4): 429-427.

González Fonteboa, B. and Martínez, F. (2005). "Hormigones con áridos reciclados: Estudio de las propiedades de los Áridos y de las Mezclas." *Materiales de Construcción*.

González Fonteboa, B., Martínez, F., Carro, D. and Eiras, J. (2010). "Shear friction capacity of recycled concretes." *Cortante-fricción de los hormigones reciclados* **60**(299): 53-67.

Grdic, Z. J., Toplicic-Curcic, G. A., Despotovic, I. M. and Ristic, N. S. (2010). "Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate." *Construction and Building Materials* **24**(7): 1129-1133.

Guedes, M., Evangelista, L., de Brito, J. and Ferro, A. C. (2013). "Microstructural Characterization of Concrete Prepared with Recycled Aggregates." *Microscopy and Microanalysis* **19**(5): 1222-1230.

Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Booya, E. and Mermerdaş, K. (2015). "Strength and permeability properties of self-compacting concrete with cold bonded fly ash lightweight aggregate." *Construction and Building Materials* **74**: 17-24.

Gupta, S., Varshney, N., Upadhyay, J., Mullick, A. K. and Murari, K. (2015). "An experimental study on self-compacting concrete with aggregates from waste material." *Indian Concrete Journal* **89**(2): 39-48.

Hansen, T. C. and Marga, M. (1988). Strength of recycled concrete made from coarse and fine recycled concrete aggregate. Demolition and reuse concrete and masonry. Proceeding of the second International RILEM symposium, Kasai, Y.

Hansen, T. C. and Narud, S. (1983). "Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate." *ACI INTERNATIONAL* **8**: 79-83.

Hendriks, C. (2000). *The Building Cycle*, Publication. Aenas Tech Pb, The Netherlands.

Hong-Kong (2002). "Especificaciones Facilitating the Use of Recycled Aggregates" Works Bureau Technical Circular 12/2002.

Hui Zhao, W. S., Xiaoming Wub, Bo Gao (2012). "The effect of coarse aggregate gradation on the properties of self-compacting concrete." *Materiales & Design*. **40**: 109-116.

IECA (2011). Estudio prenormativo sobre la utilización de los RCD's en hormigón reciclado de aplicación estructural (Proyecto RECNHOR) y reciclado de los RCD's como áridos de hormigones estructurales (Proyecto CLEAM), IECA.

IIPNRCD (2007). II Plan Nacional de residuos de construcción y demolición. Ministerio de Medio Ambiente

- Ikeda, T., Yamame, S. and Sakamoto, A. (1988). Strengths of concrete containing Recycled concrete aggregate Demolition and Reuse of Concrete Masonry Japan: 858-594.
- Jian, G. and Sun, J. (2013). "Characteristics of the carbonation resistance of recycled fine aggregate concrete." *Construction and Building Materials* **49**: 814-820.
- Jiménez, C., Barra, M., Valls, S., Aponte, D. and Vazquez, E. (2014). "Durability of recycled aggregate concrete designed with the Equivalent Mortar Volume (EMV) method: Validation under the Spanish context and its adaptation to Bolomey methodology." *Materiales de Construcción* **64**(313).
- Jiménez Montoya (2009). *Hormigón Armado*. Madrid.
- Jisc (2010). *Japanese Industrial Standard Comite*.
- Kakizaki, M., Harada, M., Soshiroda, T., Kubota, S., Ikeda, T. and Kasai, Y. (1988). Strength and elastic Modulus of Recycled Aggregate Concrete and Masonry. Demolition And Reuse of demolition Waste. RILEM Symposium on demolition and Reuse of concrete Masonry. JAPAN. **2**: 623-632.
- Kanellopoulos, A., Nicolaidis, D. and Petrou, M. F. (2014). "Mechanical and durability properties of concretes containing recycled lime powder and recycled aggregates." *Construction and Building Materials* **53**: 253-259.
- Kasai, Y. (1988). Guidelines and the Present State of the Reuse of Demolished Concrete in Japan. Demolition and Reuse of Concrete and Masonry. Proceedings of the Third International RILEM symposium. 1 8HN, First Edition Published by E&FN Spon. Edited by Lauritzen. London SE: 1994: 1993-1104.
- Katz, A. (2003). "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete." *Cement and Concrete Research* **33**(5): 703-711.
- Kebai"li, O., Mouret, M., Arabi, N. and Cassagnabere, F. (2014). "Adverse effect of the mass substitution of natural aggregates by air-dried recycled concrete aggregates on the self-compacting ability of concrete: Evidence and analysis through an example." *Journal of Cleaner Production*.
- Kebai"li, O., Mouret, M., Arabi, N. and Cassagnabere, F. (2015). "Adverse effect of the mass substitution of natural aggregates by air-dried recycled concrete aggregates on the self-compacting ability of concrete: Evidence and analysis through an example." *Journal of Cleaner Production*.
- Khafaga, S. A. (2014). "Production of high strength self compacting concrete using recycled concrete as fine and/or coarse aggregates." *World Applied Sciences Journal* **29**(4): 465-474.
- Khatib, J. M. (2005). "Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate." *Cement and Concrete Research* **35**(4): 763-769.
- Kikuchi, M. Y., A.; (1993). The total evaluation of recycled aggregates and recycled concrete. Demolition and reuse of concrete masonry, proceedings of de third international RILEM symposio Erik K. Lauritzen.
- Kong, D., Ting, L., Jianjun, Z., Chengchang, M., Jun, J. and Jing, J. (2010). "Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete." *Construction and Building Material* **24**: 701-708.
- Kou, S. C. and Poon, C. S. (2009). "Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates." *Cement and Concrete Composites* **31**(9): 622-627.
- Kou, S. C. and Poon, C. S. (2012). "Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate." *Construction and Building Material* **35**: 69-76.
- Kou, S. C., Poon, C. S. and Chan, D. (2008). "Influence of fly ash as a cement addition on the hardened properties of recycled aggregate concrete." *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* **41**(7): 1191-1201.
- Kou, S. C., Poon, C. S. and Etxeberria, M. (2011). "Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and poro size distribution of concrete." *Cement & Concrete Composites* **33**: 286-291.
- Kou, S. C., Poon, J. and Agrela, F. (2011). "Comparisons of natural and recycled aggregate concrete prepared with de addition of diferente minerale admixtures." *Cement and concrete composites* **33**(8): 788-795.
- Li, J., Qu, X., Chen, H. and Jiang, L. (2012). Experimental research on mechanical performance of self-compacting reinforced concrete beam with recycled coarse aggregates. *Advanced Materials Research*. **374-377**: 1887-1890.

- Li, J., Qu, X., Wang, L. and Zhu, C. (2011). Experimental research on compressive strength of self-compacting concrete with recycled coarse aggregates. *Advanced Materials Research*. **306-307**: 1084-1087.
- Limbachiya, M., Meddah, M. S. and Ouchagour, Y. (2012). "Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete." *Construction and Building Materials* **27**(1): 439-449.
- Limbachiya, M. C., Leelawat, T. and Dhir, R. K. (2000). "Use of Recycled concrete Aggregates in High-strength concrete " *Materials and Structures* **33**: 574-580.
- Liu, H. Q., Liu, Y. L. and Gao, L. (2014). Experimental studies on the influence of gradation of recycled coarse aggregates to the strength of self-compacting concrete. *Applied Mechanics and Materials*. **513-517**: 169-172.
- Lopez-Gayarre, F. (2008). Influencia en la variación de los parámetros de dosificación y fabricación de hormigón reciclado estructural sobre las propiedades físico mecánicas. Departamento de construcción e ingeniería de fabricación, Universidad Oviedo.
- Lopez Agüi, J. (2008). "IECA."
- Loser, R. and Leeman, A. (2009). "Shrinkage and restrained shrinkage cracking of self-compacting concrete compared to conventionally vibrated concrete." *Materials and Structures* **42**: 71-82.
- Martín-Morales, M., Sánchez-Roldán, S., Zamorano, P., Valverde, S. and Palacios, T. (2013). "Métodos granulométricos en la caracterización del árido reciclado para uso en hormigón estructural." *Materiales de Construcción* **63**(310): 235-249.
- Martin-Morales, M., Zamorano, L. and Ruiz-Moyano, J. (2011). "Characterization of Recycled aggregates construction and demolition waste concrete production following Spanish Structural Concrete Code EHE-08." *Construction and Building Materials* **25**: 742-748.
- Matias, D., Brito, J. and Rosa, A. (ASCE 2014). Durability of Concrete with Recycled Coarse Aggregates: Influence of Superplasticizers, American Society of Civil Engineers.
- Medina, C., Sánchez De Rojas, M. I., Thomas, C., Polanco, J. A. and Frías, M. (2016). "Durability of recycled concrete made with recycled ceramic sanitary ware aggregate. Inter-indicator relationships." *Construction and Building Materials* **105**: 480-486.
- Modani, P. O. and Mohitkar, V. M. (2014). "Performance of recycled aggregates in self-compacting concrete." *Indian Concrete Journal* **88**(10): 57-64.
- Molina, O. I., Moragues, A. and Galvez, J. C. (2008). "La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento Portland en la durabilidad del hormigón: propiedades físicas, difusión ion cloruro y del CO₂." *Anales de la mecánica de la fractura* **25**: 25-31.
- Mulheron, M. and Omahony (1988). The durability of recycled aggregate. Demolition and Reuse of concrete masonry RILEM Symposium **2**: 633-642.
- Nagataki, S., Gokce, A. and Saeki, T. (2000). Effects of recycled aggregate characteristics on the performance parameters of recycled aggregate concrete. Proceedings of the Fifth CANNET/ACI International Conference on Durability Concrete, Barcelona.
- Nagataki, S., Gokce, A., Saeki, T. and Hisada, L. (2004). "Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates." *Cement and concrete research* **34**: 965-971.
- Nalanth, N., Venkatesan, P. V. and Ravikumar, M. S. (2014). "Evaluation of the fresh and hardened properties of steel fibre reinforced self-compacting concrete using recycled aggregates as a replacement material." *Advances in Civil Engineering* **2014**.
- Nehdi, M. L. and Bassuoni, M. T. (2008). "Durability of self-consolidating concrete to combined effects of sulphate attack and frost action." *Materials and Structures*. **41**: 1657-1679.
- NEN.5905 (1997). "Aggregate for concrete: Materials with a density of at least 2000 kg/m³."
- Neville, A. (2011). Properties of concrete. Book. London: Pearson Education Limited.
- Nishbayashi, S. and Yamura, K. (1988). Mechanical properties and durability of concrete from recycled coarse aggregate prepared by crushing concrete second International Symposium of Demolition Waste, Japan.
- Noritaka, M., Tomoyuki, S. and Kunio, Y. (2007). "Bond splitting strength of high quality recycled coarse aggregate concrete beams." *Journal of Asian Architecture and Building Engineering* **6**: 331-337.
- Ocampo, P., Vuanello, O., Ortuzar, R. and Seminara (2010). Estudio de la carbonatación acelerada en probetas de hormigón armado. VI Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras. Córdoba.

- Olorunsogo, F. T. and Padayachee, N. (2002). "Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes." *Cement and Concrete Research* **32**(2): 179-185.
- Padmini, A., Ramamurthy, T. and Mathews, M. S. (2009). "Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete." *Construction and Building Material* **23**: 829-832.
- Panda, K. C. and Bal, P. K. (2013). Properties of self compacting concrete using recycled coarse aggregate. *Procedia Engineering*.
- Papadakis, V., Vayena, C. and Fardis, H. (1992). "Fundamental Modeling and Experimental Factors and Cement-lime Mortar Coating on Concrete Carbonation." *Materials and Structures* **25**: 293-305.
- Papadakis, V. G., Fardis, M. N. and Vayenas, C. G. (1992). "Hydration and carbonation of pozzolanic cements." *Acı Materials Journal* **89**(2): 119-130.
- Parrot, L. (1994). Design of avoiding damage due to carbonation-induced corrosion, in CANMET/ACI Conference on durability of concrete. Nice , France.
- Pereira-de-Oliveira, L. A., Nepomuceno, M. C. S., Castro-Gomes, J. P. and Vila, M. F. C. (2014). "Permeability properties of self-compacting concrete with coarse recycled aggregates." *Construction and Building Materials* **51**: 113-120.
- Perez-Benedicto J.A., Del Rio-Merino M., Peralta-Canudo J.L. and Mata, R.-L. (2012). "Características mecánicas de hormigones con áridos reciclados procedentes de rechazos en prefabricación." *Materiales de Construcción* **62**(305): 25-37.
- Pérez Benedicto, J. A. (2011). Estudio experimental sobre propiedades mecánicas del hormigón reciclado con áridos procedentes de la no calidad. Departamento de construcciones Madrid, Universidad Politécnica de Madrid.
- Pinto-Varela, E. (2012). Evaluación de la sostenibilidad ambiental de hormigones con áridos reciclados de residuos de construcción y demolición. Tesis. Barcelona, Universidad Politecnica Cataluña.
- PNRCD (2001). Plan Nacional de residuos de construcción y demolición. Ministerio de Medio Ambiente.
- Poon, C., Shui, Z. and Lam (2004). "Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates." *Construction and Building Material* **18**: 461-468.
- prEN-3242 (2002). Aggregates unbound and hydraulically bound for use in civil engineering Works and road construction
- prEN-12620 (2002). Aggregates for concrete.
- Rahal, K. (2007). "Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate." *Building and Environment* **42**: 407-416.
- Ravindrarajha, R. and Tam, c. (1987). "Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate." *Magacin of Concrete Research* **37**(130): 29-38.
- RILEM (2006). "(International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures) Specifications for Concrete with Recycled Aggregates." *Materials and Structures*.
- RILEM (First edición 1992). (International Union Of testing and research Laboratories for materials and structures) Recycled aggregates and aggregate concrete. "Recycling of demolished concrete and masonry. RILEM report , 6. T. C. Edited by Hansen, EFN Spon London SE 1 8N.
- Rodrigues, F., Evangelista, L. and de Brito, J. (2013). "A New Method to Determine the Density and Water Absorption of Fine Recycled Aggregates." *Materials Research-Ibero-American Journal of Materials* **16**(5): 1045-1051.
- Sagoe-Crentsil, K. K., Brown, T. and Taylor, A. H. (2001). "Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate." *Cement and Concrete Research* **31**(5): 707-712.
- Said, K., Belkacem, M., Amina, D. and El-Hadj, K. (2014). Effect of recycled concrete aggregates and natural pozzolana on rheology of self-compacting concrete. *Key Engineering Materials*. **600**: 256-263.
- Sakate, K. and Ayano, T. (2000). Improvement of concrete with Recycled Aggregate. C. a. I. C. o. D. Concrete. Barcelona.
- Salem, R. and Burdette, E. (1996). "Role of chemical and mineral admixtures on the physical properties and frost resistance of recycled aggregate concrete." *Materials journal* **93**(2): 182-190.

- Salleham, I. and Mahyuddin, R. (2014). "Mechanical strength and drying shrinkage properties of concrete containing treated coarse recycled concrete aggregates." *Materiales and Structures* **68**: 726-739.
- Sami and Tabsh. (2009). "Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete." *Construccion and Building Material* **23**: 1163-1167.
- Sánchez, M. (2004). Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. Tesis. Departamento de Ingeniería Civil. Madrid, ETS Caminos Madrid: 474.
- Sánchez, M. and Alaejos, P. (2009). "Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate." *Construccion and Building Material* **23**: 872-877.
- Sánchez, M. and Alaejos, P. (2010). Aspectos químicos del árido reciclado relacionado con la durabilidad del hormigón. CEDEX.
- Sánchez, M. and Alaejos, P. (2012). Estudio sobre las propiedades del hormigón fabricado con áridos reciclados. Monografías CEDEX. M. d. Fomento. Madrid. **Monografías**: 220.
- Sánchez, M., Alaejos, P. and Geraldés, L. (2010). "Conclusiones sobre reciclado de residuos de la construcción y demolición como áridos para hormigones no estructurales." *Ihobe*.
- Saravanakumar, P. and Dhinakaran, G. (2013). "Durability characteristics of recycled aggregate concrete." *Structural Engineering and Mechanics* **47**(5): 701-711.
- Saravanakumar, P. and Dhinakaran, G. (2014). "Durability aspects of HVFA-based recycled aggregate concrete." *Magazine of Concrete Research* **66**(4): 186-195.
- Seethapathi, M., Senthilkumar, S. R. R. and Chinnaraju, K. (2014). "Experimental study on high performance selfcompacting concrete using recycled aggregate." *Journal of Theoretical and Applied Information Technology* **67**(1): 84-90.
- Setién, J. and Thomas, C. (2010). Reutilización de residuos de Hormigón de una planta de prefabricados: Norten PH. Cantabria, Universidad de Cantabria.
- Shen, J., Yurtdas, I., Diagana, C. and Li, A. (2009). "Mix-design method of self-compacting concretes for pre-cast industry." *Canadian Journal of Civil Engineering* **36**(9): 1459-1469.
- Shin, M., Kim, K., Gwon, S. W. and Cha, S. (2014). "Durability of sustainable sulfur concrete with fly ash and recycled aggregate against chemical and weathering environments." *Construction and Building Materials* **69**: 167-176.
- Siddique, R. (2013). "Compressive strength, water absorption, sorptivity, abrasion resistance and permeability of self-compacting concrete containing coal bottom ash." *Construction and Building Materials* **47**: 1444-1450.
- Sidorova, A., Vacquez-Ramonic, E. and Barra-Bicinotto, M. (2014). "Study of recycled aggregates nature's influence on the aggregate-cement paste interfase and ITZ." *Construccion and Building Material* **68**: 677-684.
- Silva, R. V., De Brito, J. and Dhir, R. K. (2015). "Prediction of the shrinkage behavior of recycled aggregate concrete: A review." *Construction and Building Materials* **77**: 327-339.
- Silva, R. V., De Brito, J., Evangelista, L. and Dhir, R. K. (2016). "Design of reinforced recycled aggregate concrete elements in conformity with Eurocode 2." *Construction and Building Materials* **105**: 144-156.
- Soares, D., Brito, J., Ferreira, J. and Pacheco, J. (2014). "Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance." *Construccion and Building Material* **71**: 263-272.
- Soares, D., De Brito, J., Ferreira, J. and Pacheco, J. (2015). "Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance(Construction and Building Materials (2014) 71 (263-272))." *Construction and Building Materials* **100**: 315.
- Song, I. H. and Ryou, J. S. (2014). "Hybrid techniques for quality improvement of recycled fine aggregate." *Construction and Building Materials* **72**: 56-64.
- Sosa, I., Thomas, C. and Polanco, J. A. (2011). "Comportamiento mecánico de áridos reciclados para hormigón." *Anales de mecánica de la fractura* **1**.
- Sun, L., Ge, D., Ren, F., Liang, R., Wang, Z. and Hao, H. (2014). "Recycled aggregate concrete by using waste concrete as aggregate in construction working place." *Beijing Jiaotong Daxue Xuebao/Journal of Beijing Jiaotong University* **38**(1): 20-23+28.

Tam, V. and Wang, K. (2007). "Assessing relationship among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis." *Hazard Materials* **152**(57): 703-714.

Tang, W. (2013). Fresh properties of self-compacting concrete with coarse recycled aggregate. *Advanced Materials Research*. **602-604**: 938-942.

TC-121, R. (2006). "RILEM International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures. Specifications for Concrete with Recycled Aggregates." *Materials and Structures Details*.

Thomas, C. (2010). Hormigón reciclado de aplicación estructural: Durabilidad en ambiente marino y comportamiento a fatiga. Tesis. Departamento de Ciencia e Ingeniería de Terreno y de los Materiales. Santander, Universidad de Cantabria: 458.

Thomas, C., Carrascal, C., Setién, J. and Polanco, J. A. (2009). "Determinación límite de fatiga en hormigones reciclados de aplicación estructural." *Anales de la mecánica de la fractura* **26**: 283-288.

Thomas, C., Cimentada, A., Setién, J., Polanco, J. A., Rico, J. and Sosa, I. (2011). "Waste With sulfur from tested concrete specimens as aggregate for structural recycled concrete in: Wastes Solutions treatments and opportunities 1st international conference " **1**: 183-189.

Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A. and Alaejos, P. (2013). "Durability of recycled aggregate concrete." *Construction and Building Material* **40**: 1054-1065.

Thomas, C., Sosa, I., Setien, J., Polanco, J. A. and Cimentada, A. I. (2014). "Evaluation of the fatigue behavior of recycled aggregate concrete." *Journal of Cleaner Production* **65**: 397-405.

Topcu-İK and Sengel, S. (2004). "Properties of concretes produced with waste concrete aggregate." *Cement & Concrete Research* **34**: 1307-1312.

Tsung-Yueh Tu, Y.-Y. C., Chao-Lung Hwang (2006). "Properties of HPC with recycled aggregates." *Cement and Concrete Research* **36**(5): 943-950.

UE (2011). "Reglamento (UE) No 305/2011 del Parlamento Europeo y del consejo por el que se establecen condiciones armonizadas para la comercialización de productos de construcción y se deroga la Directiva 89/106/CEE del Consejo."

UNE-7133 (1958). Determinación de terrones de arcilla en áridos para la fabricación de morteros y hormigones.

UNE-EN-933-1 (2006). Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos Parte 1 Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.

UNE-EN-933-3 (2006). Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos Parte Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas.

UNE-EN-933-4 (2006). Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos Parte 4 Determinación de la forma de las partículas. Coeficiente de forma.

UNE-EN-933-11 (2009). Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos: Parte 11: Ensayo de clasificación de componentes de los áridos gruesos reciclados.

UNE-EN-1097-5 (1999/A1:2007). Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2 Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación.

UNE-EN-1097-6 (2001). Ensayo para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua.

UNE-EN-1339 (2003). Baldosas de hormigón: Especificaciones y métodos de ensayo.

UNE-EN-1341 (2002). "Baldosas de piedra natural para uso como pavimento exterior: Requisitos y método de ensayo."

UNE-EN-1367-2 (1999). Ensayos para determinar las propiedades térmicas y de alteración de los áridos Parte 2 Ensayo de sulfato de magnesio.

UNE-EN-1744-1 (1999). AP 14.2. Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Determinación de contaminantes ligeros.

UNE-EN-1916 (1999). Tubos y piezas complementarias de hormigón en masa, hormigón armado y hormigón con fibras.

UNE-EN-12350-2 (2006). Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento.

UNE-EN-12350-8 (2011). Ensayos de hormigón fresco. Parte 8: Hormigón autocompactante. Ensayo de escurrimiento.

UNE-EN-12390-3 (2009). Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3 Determinación de la resistencia a compresión de probetas.

UNE-EN-12390-5 (2009). Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6 Resistencia a flexión de probetas.

UNE-EN-12390-6 (2009). Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6 Determinación tracción indirecta.

UNE-EN-12390-7 (2009). Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7 Densidad hormigón endurecido.

UNE-EN-12390-8 (2006). Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Ensayo de permeabilidad al agua bajo presión.

UNE-EN-12390-9 (2006). Ensayos de hormigón endurecido. Parte 9: Ensayo de resistencia hielo-deshielo. Pérdida de masa superficial.

UNE-EN-12504-4 (2006). Ensayos de hormigón de estructuras. Parte 4 Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos

UNE-EN-14066:2014 (2014). Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia al envejecimiento por choque térmico.

UNE-EN-17744-AP7 (2012). Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1 análisis químico. Apartado 7: Determinación de los cloruros solubles en agua empleando el método de Volhard.

UNE-EN-17744-AP10.2° (2012). Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1 análisis químico. Apartado 10.2°: Determinación de los sulfatos solubles en agua en áridos reciclados.

UNE-EN-17744-AP12 (2010). Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1 análisis químico. Apartado 12: Determinación de los sulfatos solubles en ácido.

UNE-EN-17744-AP14.2° (2012). Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1 análisis químico. Apartado 14.2°: Determinación de contaminantes ligeros.

UNE-EN-17744-AP16° (2012). Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1 análisis químico. Apartado 16: Determinación de la solubilidad al agua.

UNE-EN-17744-AP17° (2012). Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1 análisis químico. Apartado 17: Determinación de las pérdidas por calcinación.

UNE-EN-83112 (1999). Áridos para hormigones. Determinación del índice de machacabilidad.

UNE-EN-83316 (1996). Determinación del módulo de elasticidad en compresión.

UNE-EN-83318 (1994). Ensayos del hormigón Determinación de los cambios de longitud.

UNE-EN-83982 (2006). Determinación de la absorción capilar del hormigón endurecido Método de Fagerlund.

UNE-EN-146509-EX (1999). "Determinación de la reactividad potencial de los áridos con los alcalinos Métodos de los prismas de hormigón."

UNE-ISO-6988 (1985). "Ensayo de dióxido de azufre con condensación general de humedad (DIN 50018)."

Uygunoğlu, T., Topçu, I. B. and Çelik, A. G. (2014). "Use of waste marble and recycled aggregates in self-compacting concrete for environmental sustainability." *Journal of Cleaner Production*.

Uysal, M. (2012). "The influence of coarse aggregate type on mechanical properties of fly ash additive self-compacting concrete." *Construction and Building Material* **37**: 53-540.

Vieira, T., Alves, A., de Brito, J., Correia, J. R. and Silva, R. V. (2016). "Durability-related performance of concrete containing fine recycled aggregates from crushed bricks and sanitary ware." *Materials and Design* **90**: 767-776.

Vincke, J. and Rousseau, E. (1994). "Recycling of Construction and Demolition Waste in Belgium: Actual Situation and future evolution. Demolition and reuse of concrete and Masonry. Proceedings of the third International RILEM Symposium. ." Lauritzen, E.K **First Edition 1994**(London SE 1 8HN): 57-69.

Wai Hoe, K., Mahyuddin, R., Kenn Jhun, K. and Mohd Zailan, S. (2012). "Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties." *Construction and Building Material* **26**: 565-578.

- Wang, C., Xiao, J., Zhang, G. and Li, L. (2016). "Interfacial properties of modeled recycled aggregate concrete modified by carbonation." *Construction and Building Materials* **105**: 307-320.
- Wang, H.-l., Wang, J.-j., Sun, X.-y. and Jin, W.-l. (2013). "Improving performance of recycled aggregate concrete with superfine pozzolanic powders." *Journal of Central South University* **20**(12): 3715-3722.
- Wang, H. C., Wang, X. H. and An, X. H. (2014). The comparison of self-compacting rock-filled concrete with large-size natural and recycled aggregate. *Applied Mechanics and Materials*. **513-517**: 20-23.
- Wang, W.-l., Kou, S.-c. and Xing, F. (2013). "Deformation properties and direct shear of medium strength concrete prepared with 100% recycled coarse aggregates." *Construction and Building Materials* **48**: 187-193.
- Xiao, J., Fan, Y. and Tam, V. W. Y. (2015). "On creep characteristics of cement paste, mortar and recycled aggregate concrete." *European Journal of Environmental and Civil Engineering* **19**(10): 1234-1252.
- Xiao, J., Li, L., Shen, L. and Poon, C. S. (2015). "Compressive behaviour of recycled aggregate concrete under impact loading." *Cement and Concrete Research* **71**: 46-55.
- Xiao, J., Sun, C. and Jiang, X. (2015). "Flexural behaviour of recycled aggregate concrete graded slabs." *Structural Concrete* **16**(2): 249-261.
- Xiao, J. Z., Lei, B. and Zhang, C. (2012). "On carbonation behavior of recycled aggregate concrete." *Science China Technological Sciences* **55**(9): 2609-2616.
- Xiao, J. Z., Li, J. B. and Zhang, C. (2005). "Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading." *Cement and Concrete Research* **35**(6): 1187-1194.
- Xie, Y., Corr, D. J., Jin, F., Zhou, H. and Shah, S. P. (2015). "Experimental study of the interfacial transition zone (ITZ) of model rock-filled concrete (RFC)." *Cement and Concrete Composites* **55**: 223-231.
- Xuan, D., Zhan, B. and Poon, C. S. (2016). "Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates." *Cement and concrete composites* **65**: 67-74.
- Yazdanbakhsh, A. and Bank, L. C. (2016). "The effect of shear strength on load capacity of FRP strengthened beams with recycled concrete aggregate." *Construction and Building Materials* **102**: 133-140.
- Yoda, K. and Shintani, A. (2014). "Building application of recycled aggregate concrete for upper-ground structural elements." *Construction and Building Materials* **67**(PART C): 379-385.
- Yu, J. J., Gong, J., Zou, J. M. and Yang, W. K. (2014). Study on properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate. *Applied Mechanics and Materials*. **638-640**: 1494-1498.
- Yuan, Y., Takao, U. and Yu, C. (2012). SCC produced with recycled concrete aggregates. *Advanced Materials Research*. **512-515**: 2986-2989.
- Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F. and Wirquin, E. (2004). "Frost resistance of recycled aggregate concrete." *Cement and Concrete Research* **34**(10): 1927-1932.
- Zega, D. and Maio, I. (2011). "Recycled Concretes Made with Waste Ready-Mix Concrete as Coarse Aggregate." *Journal and materials in civil engineering* **23**(3): 281-286.
- Zoran, J. G., Gordana, A., Toplicic-Curcic, A., Despotovic, I. M. and Ristic, N. S. (2010). "Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate." *Construction and Building Material* **24**: 1129-1133.

