

CAPÍTULO 1

ESTADO DEL CONOCIMIENTO

En el presente capítulo, se hace una revisión de los distintos conceptos que serán manejados a lo largo de la Tesis mediante un análisis de la situación actual en cuanto al reciclaje de residuos de construcción y demolición, en adelante RCD, los áridos reciclados y de aquéllos susceptibles de ser utilizados en la fabricación de hormigón reciclado. Finalmente, se realiza un estudio en profundidad del estado del conocimiento en referencia al hormigón reciclado.

Los RCD son, por definición, residuos que se generan, como su propio nombre indica, en obras de construcción y demolición y, al mismo tiempo, cumplen con la definición de “*residuo*” incluida en la Ley 10/1998, del 21 de abril, artículo 3.a. Esta definición, abarca las actividades de construcción, reparación, reforma o demolición de edificaciones u obras de ingeniería civil.

Los datos que actualmente se manejan en cuanto a la producción de RCD en España, están basados en la producción de las Comunidades Autónomas y transmitidos por éstas al Ministerio de Medio Ambiente con el fin de elaborar un Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición [1]. Según estos valores, en el año 2005 se sitúa en más de 25 millones de toneladas, habiendo cuantificado solamente los datos proporcionados por aquellas Comunidades que disponen de plantas de tratamientos para los mismos, y que, por supuesto, no lo son todas. Un estudio realizado en España por Euroconstruct [2], de junio de 2006, sitúa la contribución de la ingeniería civil en un 28% del total: en torno a los 35 millones de toneladas en todo el país. Por otro lado, según el GERD¹ [3] la producción de RCD en el año 2003 se sitúa por encima de las 38 millones de toneladas.

Estos residuos están formados principalmente por materiales cerámicos y hormigón, aunque en menor proporción también se encuentran otros como piedra, áridos, madera, metales o plásticos. Aproximadamente un 20% del total corresponde a escombros de hormigón. Este último parece ser el componente de los RCD que proporciona, tras su procesado, un árido reciclado de mejores características y, por ello, el más adecuado para la fabricación de hormigón reciclado, utilizado solo o mediante mezcla del mismo con áridos naturales.

Tal y como se recoge en la publicación “Hormigón Reciclado” de la Comisión Permanente del Hormigón [4], los grandes volúmenes de generación de residuos inertes y el incremento de consumo de áridos hace interesante la idea del reciclaje de residuos para su incorporación a hormigones. A todo ello se suma la reivindicación de colectivos ecologistas, unidos a una creciente concienciación ciudadana, respecto a la necesidad de potenciar el reciclaje de los materiales que han cumplido su vida útil. Esta política presenta grandes atractivos frente a la utilización de materias primas naturales. La ventaja más destacada es que soluciona, a un mismo tiempo, la problemática originada por la eliminación de unos subproductos de desecho y que, mediante el aprovechamiento de estos residuos, se obtiene una nueva materia prima con lo que se reduce la cantidad de recursos naturales primarios a extraer.

¹ Gremio de Entidades del Reciclaje de Derribos españolas.

Como puede presumirse, la utilización de RCD supone también reducir el espacio destinado a escombreras de residuos, así como el número de explotaciones mineras necesarias para suministrar la materia prima original, reduciendo el impacto medio ambiental y favoreciendo la protección de unos recursos naturales siempre limitados.



Fig. 1. Residuos de construcción y demolición en un vertedero de materiales inertes.

Así, el reciclado de materiales de construcción puede suponer una actividad con interesantes expectativas de crecimiento, con el hándicap del bajo precio tanto de los materiales de construcción tradicionalmente empleados, como del traslado, aún, a vertedero de los posibles residuos generados. La aparición de legislación al respecto y los cánones por la gestión de residuos en distintas Comunidades Autónomas está fomentando la creación y el fortalecimiento de empresas asociadas a la gestión y al reciclaje de RCD.

Según ANEFA¹ [5], el consumo de áridos en España durante el año 2003 alcanzó unos 451 millones de toneladas, de los cuales se podría estimar, a partir de datos relativos a años anteriores, que aproximadamente el 65% se dedica a la fabricación de hormigones, morteros, aglomerados asfálticos y prefabricados y el 35% restante a la construcción de bases y subbases en carreteras, rellenos, escolleras y como balasto de ferrocarril. Es decir, los 7,7 millones de toneladas de residuos de hormigón

¹ Asociación Española de Fabricantes de Áridos.

suponen aproximadamente un 2,6% de la producción del árido natural destinado a la fabricación de hormigones y morteros en España.



Fig. 2. Demolición selectiva en la que, primero, se elimina la tabiquería y otros componentes para, finalmente, demoler la estructura de hormigón.

El Ministerio de Medio Ambiente publicó en el año 2001 un Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (PNRCD) [1], incluyendo en la denominación de los RCD a los escombros generados por la construcción o demolición de edificaciones u obra civil. El período de aplicación del Plan fue de cinco años, y como previsión en la gestión de los residuos, estima una disminución de un 10% en la generación de RCD y un nivel de reciclado del 25% en el año 2006. Sin embargo, los objetivos, llegado el año 2006, no fueron del todo alcanzados y motivado por ello se desarrolló un Segundo Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (II PNRCD) [6] con un periodo de aplicación, también de 5 años, 2007-2012, con los mismos objetivos que el Primer Plan. Todo ello dentro de un plan mucho más ambicioso, el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) [7] para el período 2007-2015.

Con el propósito de elaborar unas recomendaciones de utilización en el campo del hormigón estructural, en Noviembre de 2002 se constituyó el Grupo de Trabajo 2/5 “Hormigón Reciclado” [4] a instancias de la Comisión Permanente del Hormigón [8]. De estas tentativas surgió el Proyecto Nacional que llevó por título “RECNHOR” o “Estudio prenormativo sobre la utilización de residuos de construcción y demolición

en hormigones reciclados de aplicación estructural” y del que forma parte la presente investigación. Este proyecto de investigación dio comienzo en el año 2006 finalizando en el año 2009, y tuvo continuidad dentro del marco de un proyecto mucho más ambicioso, el proyecto “CLEAM” o Construcción Limpia, Eficiente y Amigable con el Medio Ambiente, Fig. 3, con un periodo de aplicación de dos años: 2009 y 2011.

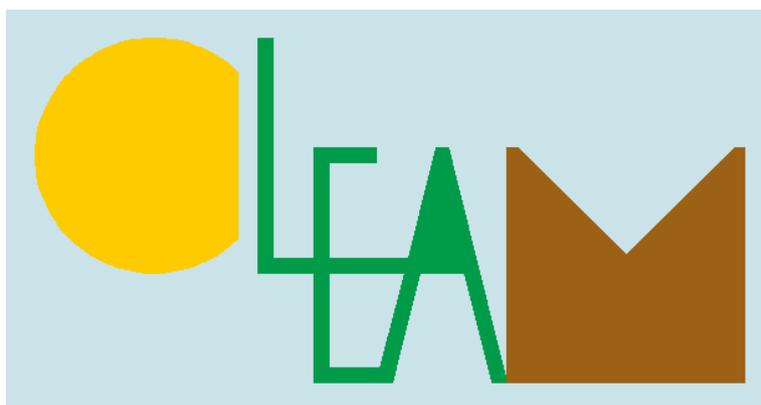


Fig. 3. Logotipo del proyecto CLEAM

En el primero de los proyectos, RECINHOR, se realiza una comprobación experimental de las recomendaciones que, posteriormente, se incluirían en el anejo de la revisión de la Instrucción Española del Hormigón Estructural del año 2008 o EHE-08 [9]. Entre las recomendaciones, se establecen unas limitaciones al uso del árido reciclado en hormigón estructural, cuyas líneas generales se señalan a continuación y que son también un extracto de las conclusiones finales del proyecto:

- La aplicación de árido reciclado queda restringida a los casos de hormigón en masa y armado, excluyendo su uso en hormigón pretensado.
- Sólo se aconseja la utilización de árido procedente del reciclado de hormigón convencional, excluyendo hormigones especiales tales como hormigones ligeros, hormigones con fibras o aquellos fabricados con cemento aluminoso. Asimismo, se incluyen recomendaciones sobre cuál debe ser la calidad del hormigón de origen para garantizar la obtención final de un árido de propiedades adecuadas y con una uniformidad suficiente.
- Con carácter general se contempla la utilización de la fracción gruesa del árido reciclado (tamaño mínimo superior a 4 mm), sustituyendo a una cantidad limitada

del árido natural, también grueso, que será fijada en la recomendación en el 20% de sustitución en peso.

- La utilización del árido reciclado en hormigones que vayan a estar expuestos a ambientes agresivos, estará condicionada por la necesidad de tomar precauciones especiales que se precisarán en cada caso, y que pueden incluir, por ejemplo, recomendaciones para utilizar una única fuente de árido reciclado controlada, realización de ensayos complementarios, incremento en el contenido de cemento o disminución de la relación agua/cemento en la dosificación.
- La limitación al porcentaje de árido reciclado que se recomienda utilizar, así como las especificaciones que se exijan en cuanto a su calidad y uniformidad, van a permitir garantizar un hormigón reciclado cuyas propiedades no difieran sustancialmente de las del hormigón convencional.

1.1. LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

1.1.1. Introducción

El primer PNRC¹ 2001-2006 [1], fue aprobado por Acuerdo del Consejo de Ministros de fecha 1 de junio de 2001, apareciendo publicado en el Boletín Oficial del Estado del 12 de julio de 2001 y con un período de vigencia que finalizó el 31 de diciembre de 2006.

En los términos previstos en el artículo 5 de la Ley 10/1998, de 21 de abril, de residuos, el objeto del Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición es establecer los objetivos de prevención, reutilización, reciclado, otras formas de valorización y eliminación de los RCD en España, las medidas para conseguir dichos objetivos, los medios de financiación y el procedimiento de revisión.

La redacción del II PNRC¹ [6], como continuación del anterior, parte de la experiencia adquirida en el desarrollo y aplicación del PNRC¹ 2001-2006. El nuevo plan toma como base principal los planes de las Comunidades Autónomas y de las Entidades locales relativos a RCD, así como el resultado del “Estudio sobre la generación y gestión de los residuos de construcción y demolición en España”, Ministerio de Medio Ambiente, 2006 [10].

La información de partida sobre producción y gestión de RCD para la redacción del II PNRC¹ se ha obtenido de los planes regionales o locales y de otras fuentes de información relevante (empresas constructoras, gestoras de residuos, etc). Forma parte del PNIR² [7] para el período 2007-2015.

Como se ha comentado, el residuo de construcción y demolición es cualquier sustancia u objeto que, cumpliendo la definición de “residuo” incluida en la Ley 10/1998, de 21 de abril, se genera en una obra de construcción y demolición.

También debe entenderse como obra, tal y como recoge el Plan, o al menos como parte integrante de una obra, la realización de trabajos que modifiquen la forma o

¹ Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición

² Plan Nacional Integrado de Residuos

sustancia del terreno o del subsuelo, tales como excavaciones, dragados, sondeos, prospecciones, inyecciones, urbanizaciones u otros análogos, pero excluyéndose aquellas actividades a las que sea de aplicación la Directiva 2006/21/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de marzo, sobre la gestión de los residuos de industrias extractivas. Es decir, tal y como se recoge, se considerará parte integrante de la obra toda instalación que dé servicio exclusivo a la misma, y en la medida en que su montaje y desmontaje tenga lugar durante la ejecución de la obra o al final de la misma, tales como:

- plantas de machaqueo,
- plantas de fabricación de hormigón, grava-cemento o suelo-cemento,
- plantas de prefabricados de hormigón,
- plantas de fabricación de mezclas bituminosas,
- talleres de fabricación de encofrados,
- talleres de elaboración de ferralla,
- almacenes de materiales y almacenes de residuos de la propia obra y
- plantas de tratamiento de los residuos de construcción y demolición de la obra.

Si bien, desde el punto de vista conceptual, la definición de RCD abarca a cualquier residuo que se genere en una obra de construcción y demolición, el ámbito de aplicación del presente Plan se restringe a los residuos que caigan dentro de la definición de RCD, con excepción de: (a) las tierras y piedras no contaminadas por sustancias peligrosas; (b) los residuos que se generen en obras de construcción y/o demolición regulados por una legislación específica, cuando no estén mezclados con otros residuos de construcción y demolición; (c) los residuos regulados por la Directiva 2006/21/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de marzo, sobre la gestión de los residuos de industrias extractivas.

El motivo de esta exclusión es que pueden y deben ser reutilizadas en la misma obra, en una obra distinta, o en una actividad de restauración, acondicionamiento o relleno,

con lo que el potencial impacto ambiental negativo de dichos residuos puede evitarse con una adecuada planificación de las obras.

Clasificaciones, como la del Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña del año 2002 [11], se realizan en base a la procedencia y la naturaleza de los residuos. Por ejemplo, se seleccionan residuos originados en operaciones de desmontaje, desmantelamiento, derribo, reparaciones o rehabilitación.

Los residuos objeto del II PNRCO aparecen codificados en la Lista Europea de Residuos, aprobada por Orden MAM/304/2002 (BOE núm 43, de 19-02-2002), básicamente, en el capítulo 17 (Residuos de la construcción y demolición). Dicho capítulo clasifica los residuos en 9 tipos, tal y como se recoge en la Tabla 1.

Tabla 1. Lista Europea de Residuos según el Ministerio de Medio Ambiente.

Lista Europea de Residuos (MAM/304/2002)	
Código	Descripción
17 01	Hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos.
17 02	Madera, vidrio y plástico.
17 03	Mezclas bituminosas, alquitrán de hulla y otros productos alquitranados.
17 04	Metales (incluidas sus aleaciones).
17 05	Tierra (incluida la excavada de zonas contaminadas), piedras y lodos de drenaje.
17 06	Materiales de aislamiento y materiales de construcción que contienen amianto.
17 08	Materiales de construcción a partir de yeso.
17 09	Otros residuos de construcción y demolición.

El sector que origina los RCD coincide con las actividades agrupadas en la Sección F de la Clasificación Nacional de Actividades Económicas (CNAE-93) bajo el epígrafe de “Construcción” [12].

Los residuos generados en la industria de los productos de construcción (cerámicos, prefabricados, materiales de construcción, etc), no se incluyen en el PNRC, aunque, como puede suponerse, presenten características similares a los residuos generados en las obras, estos residuos están sujetos a las prescripciones del PNRI¹.

1.1.2. Marco legal

A continuación, se recogen algunas de las normativas, en relación con la gestión y valorización de RCD a nivel local, nacional, comunitario e internacional recopiladas en [4].

1.1.2.1. Normativa de entidades locales

Según el artículo 4 de la Ley 10/1998, de residuos, las Entidades Locales son competentes para la gestión de los residuos urbanos, en los términos establecidos en dicha Ley y en las que, en su caso, dicten las Comunidades Autónomas. Se considera “residuo urbano”, en el artículo 3 de la misma Ley, también los residuos y escombros procedentes de obras menores de construcción y reparación domiciliaria. Éstos serían los RCD cuya gestión son competencia de las Entidades Locales, y para los que los municipios deben ofrecer un servicio de recogida, transporte y eliminación. El tipo de gestión de estos RCD se establece mediante las respectivas Ordenanzas.

En un marco más amplio, las Comunidades Autónomas pueden declarar servicio público, de titularidad local, todas o algunas de las operaciones de gestión de los RCD. La forma en que las Entidades locales intervienen en las actividades de producción y gestión de RCD varía de unas Comunidades Autónomas a otras. Entre las motivos más importantes, en cuanto a las diferencias observadas, están el grado de intervención que la entidad local, históricamente, ha tenido en la gestión de los RCD en su territorio, el reparto competencial establecido en la legislación propia y el modelo de gestión de los RCD establecido en el PARCD², como por ejemplo el de la Comunidad de Madrid [13].

¹ Plan Nacional de Residuos Industriales No Peligrosos

² Plan Autonómico de Residuos de Construcción y Demolición.

1.1.2.2. Marco legal nacional

La legislación española que afecta a los RCD es la Ley 10/1998 de residuos. Para los residuos peligrosos que puedan producirse en obras de construcción y demolición se aplica el régimen general de residuos peligrosos, Ley 10/1998 y el Real Decreto 952/1997. Para los RCD cuyo destino sea el vertedero, la normativa de aplicación es el Real Decreto 1481/2001, del 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante traslado a vertedero. La Decisión comunitaria 2003/33/CE, por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos, entró en vigor el 16 de julio de 2004, momento desde el que son de aplicación, en España, los procedimientos de admisión de residuos en los vertederos.

1.1.2.3. Marco legal comunitario

Desde finales de los años 90 se consideran los RCD como un “flujo prioritario de residuos”. Al día de hoy, la legislación comunitaria que regula su producción y gestión es la Directiva 2006/12/CE, del Parlamento y del Consejo, del 5 de abril, relativa a los residuos (codificación de la Directiva 75/442/CEE).

Aparte de la Directiva Marco de residuos, los RCD están también regulados por el resto de Directivas derivadas de la anterior, en la medida en que les sea de aplicación. Por su parte, al igual que sucede en España, a los residuos peligrosos que se generen en las obras de construcción y demolición se les aplica una normativa específica, la Directiva 91/689/CEE.

Existe una legislación comunitaria específica relativa a los residuos destinados a vertedero, constituida por la Directiva 1999/31/CE, por la Decisión del Consejo 2003/33/CE, de 19 de diciembre de 2002, por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y el anexo II de la Directiva 1999/31/CE.

1.1.3. Producción de RCD en España

Según el II PNRCD, los residuos de construcción y demolición proceden en su mayor parte de derribos de edificios o de rechazos de los materiales de construcción de las obras de nueva planta y de pequeñas obras de reformas en viviendas o urbanizaciones. Se denominan habitualmente como “escombros”. Con arreglo a la

legislación española –Ley 10/1998 de Residuos– las competencias sobre el control de su producción y gestión corresponde a las Comunidades Autónomas, a excepción de los RCD procedentes de obras menores domiciliarias, cuya gestión (al menos la recogida, transporte y eliminación) corresponde a las Entidades locales.

Si bien la mayor parte de los residuos que se generan en actividades de construcción y demolición no suelen revestir características de peligrosidad, su recogida de forma no selectiva provoca la mezcla de distintos tipos de residuos que no son peligrosos entre sí pero que, al mezclarse, pueden dar lugar a residuos contaminados en su conjunto, lo que impide someterlos a un aprovechamiento apropiado o a que se envíen a vertederos que no cuentan con las medidas de protección adecuadas al tipo de residuo que reciben.

Sin embargo, la mayor parte de los RCD se pueden considerar inertes o asimilables a inertes, y por lo tanto su poder contaminante es relativamente bajo pero, por el contrario, su impacto visual es con frecuencia alto por el gran volumen que ocupan y por el escaso control ambiental ejercido sobre los terrenos que se eligen para su depósito.

Los denominados residuos inertes pueden tener distintas procedencias:

- La ejecución de obras para la implantación de servicios en las zonas urbanas (abastecimiento y saneamiento, telecomunicaciones, tendido eléctrico, etc.);
- Las obras de reforma en calles del casco urbano;
- Las obras menores de rehabilitación de viviendas;
- Los originados en reparaciones de carreteras e infraestructuras;
- La mezcla de los escombros de construcción y/o demolición de edificios, y
- Los rechazos o roturas de la fabricación de piezas y elementos de construcción.

El sector de la construcción se ha caracterizado en España por un gran dinamismo durante los últimos años, alcanzando de forma sostenida índices de crecimiento muy por encima de la media del crecimiento de la economía española.

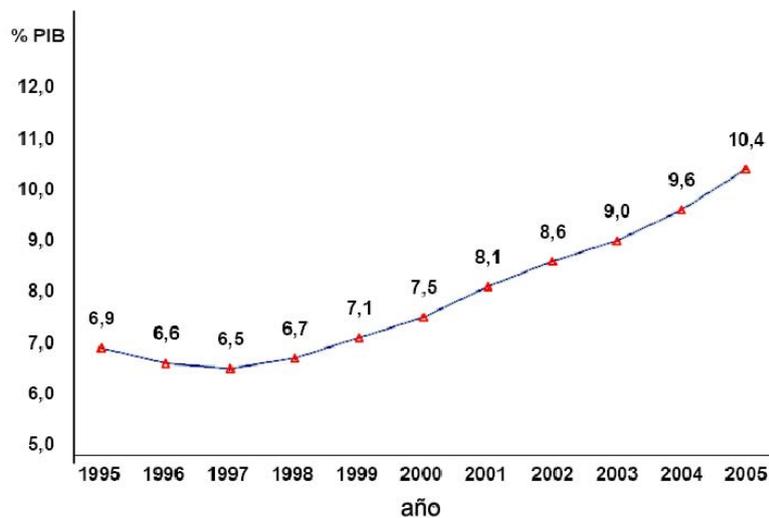


Fig. 4. Porcentajes sobre el Producto Interior Bruto (PIB) español correspondientes al sector de la construcción a lo largo de los últimos años.

En el año 2004 la construcción representó el 9,6% del PIB dando empleo a 2,3 millones de personas, Fig. 4, que representaban el 12,7% de la población activa. Todo ello viene derivado de altas tasas sostenidas de inversión pública, por el desarrollo de planes de infraestructuras en redes de transporte por carretera, ferroviaria, portuaria y aeroportuaria, en instalaciones de generación de energía, así como por la inversión privada en la construcción, rehabilitación y reforma de edificaciones para uso de vivienda, turístico y de servicios.

Como recuerda el II PNRC, la actividad constructora en España ha llevado aparejada una creciente generación de residuos, Tabla 2. Cualquier objetivo de prevención del volumen de la generación de RCD se ha visto superado por un nivel de actividad que, en lo que respecta a sus consecuencias ambientales, es insostenible en las condiciones actuales.

De los datos presentados en el II Plan, se deduce que no existe información muy precisa sobre los residuos generados por el sector de la construcción. Ante la necesidad de disponer de datos para elaborar las actuaciones a realizar dentro del Plan Integral de Residuos, se ha recurrido a interrelacionar la información disponible.

Tabla 2. Desglose de la producción de RCD según el origen de los mismos 2001-2005 (PNRCD) en España [4].

Tipo de obra	2001	2002	2003	2004	2005
Edificación:					
▪ obra nueva	10.270.920	10.274.640	11.649.720	13.139.640	14.149.080
▪ rehabilitación	914.490	865.040	1.006.278	1.010.342	909.748
▪ demolición total	4.493.420	4.399.713	5.444.038	6.446.590	7.860.098
▪ demolición parcial	1.147.064	1.122.678	1.231.965	1.360.219	1.297.898
▪ obras sin licencia	841.295	833.104	966.600	1.097.840	1.210.841
Obra civil	6.543.403	6.479.649	7.518.000	8.538.752	9.417.654
Total RCD generados	24.210.592	23.974.824	27.816.601	31.593.383	34.845.319

Analizada toda la información disponible se ha optado por utilizar los siguientes índices para establecer el volumen de RCD generados en cada uno de los tipos de obra de edificación analizados y que requieren licencia de obra:

- Hay una parte de la actividad constructiva que no requiere la solicitud de licencia de obra y por tanto no están incluidas en las estadísticas pero, sin embargo, son generadoras de residuos. Se ha considerado que estas actuaciones sin licencia pueden suponer el 5% de las obras con licencia.
- Para la determinación de los residuos procedentes de obra civil se ha partido del supuesto, según el Informe Euroconstruct de junio de 2006 [2], de que la contribución de la ingeniería civil a los mercados de la construcción en España se puede estimar en un 28% y, por tanto, al hacer el cálculo del total de RCD producidos se establece que el 28% procederá de la Obra Civil.
- Del cruce de toda esta información puede estimarse que los residuos de construcción y demolición generados en España entre los años 2001 y 2005 son los que se detallan en la Tabla 2.
- Se puede establecer que la generación de RCD en España ha crecido en los cinco años analizados a un ritmo medio del 8,7% anual.

Así, la gestión de los RCD comprende el conjunto de actividades encaminadas a dar a estos residuos el destino más adecuado, de acuerdo con sus características, para proteger la salud humana, los recursos naturales y el medio ambiente.

De acuerdo con el llamado principio de jerarquía, definido en el artículo 1.1 de la Ley 10/1998, de Residuos, es necesario:

- Reducir la producción de residuos,
- Reutilizar lo que se pueda,
- Reciclar lo que no se pueda reutilizar,
- Seleccionar en origen los materiales reciclables o valorizables,
- Valorizar energéticamente todo lo que no se pueda reutilizar o reciclar,
- Depositar en vertedero controlado todos aquellos residuos que no tengan valor económico.

1.1.4. Objetivos del II PNRC

En vista de lo comentado anteriormente, fueron planteados los siguientes objetivos específicos dentro del II PNRC:

- Reducir en origen la generación de RCD,
- Valorizar todo lo posible (reciclar, reutilizar),
- Aplicar el principio de jerarquía,
- Crear la red de infraestructuras necesarias,
- Adaptación de todos los vertederos al Real Decreto,
- Clausurar vertederos inadaptables.

Y en base a estas premisas se pretenden los siguientes objetivos cuantitativos:

- Recogida controlada y correcta gestión del 95% de los RCD a partir de 2011,
- Reducción o reutilización del 15% de RCD en 2011,
- Reciclaje del 40% de RCD, a partir de 2011.

1.2. LOS ÁRIDOS RECICLADOS

1.2.1. Introducción

En un contexto general, se entiende por árido reciclado aquel “árido resultante del procesamiento de materiales inorgánicos utilizados previamente en la construcción” tal y como recoge el proyecto de norma prEN¹ 13242 “*Aggregates unbound and hydraulically bound for use in civil engineering works and road construction*” en su versión de Mayo de 2002 [14] y prEN 12620 “*Aggregates for concrete*” de abril de 2002 [15]. Las materias primas para su obtención, son pues, los materiales pétreos² generados como residuo durante los procesos de construcción y demolición.

Un caso particular de áridos reciclados, son los residuos de hormigón de cemento con clinker Portland y áridos naturales, machacados, cribados y procesados en plantas de reciclado y que dan lugar al material secundario denominado “árido reciclado de hormigón”. En el caso del árido reciclado de hormigón, éste deriva de un solo tipo de material primario, el hormigón, cuya composición, como es sabido, es heterogénea: cemento, agua, áridos, aditivos y/o adiciones. El material obtenido de esta forma no puede considerarse, por tanto, un material homogéneo, Fig. 5 y Fig. 6. Las diferencias en la composición pueden ser notables en función, principalmente, de la proporción de mortero presente en el residuo y su naturaleza. También hay que considerar la presencia de subcomponentes, que pueden admitirse hasta un cierto límite, siempre que sean de naturaleza pétreo.

El otro tipo de árido reciclado es el “Árido reciclado cerámico”, Fig. 7, árido que se obtiene por procesamiento de material predominantemente cerámico. El 85% de este árido debe tener una densidad seca superior a 1,6 g/cm³ según la norma holandesa [16], para evitar materiales excesivamente porosos y ligeros.

Una catalogación actual ha sido propuesta por el CEDEX³, para el Ministerio de Medio Ambiente en el año 2008, y lleva por título “*Catálogo actualizado de residuos utilizables en la construcción*” [17].

¹ Proyecto de Norma Europea.

² Diccionario María Moliner, en su acepción particular: “*duro y fuerte como la piedra*”.

³ Centro de Estudios Experimentales del Ministerio de Fomento español.

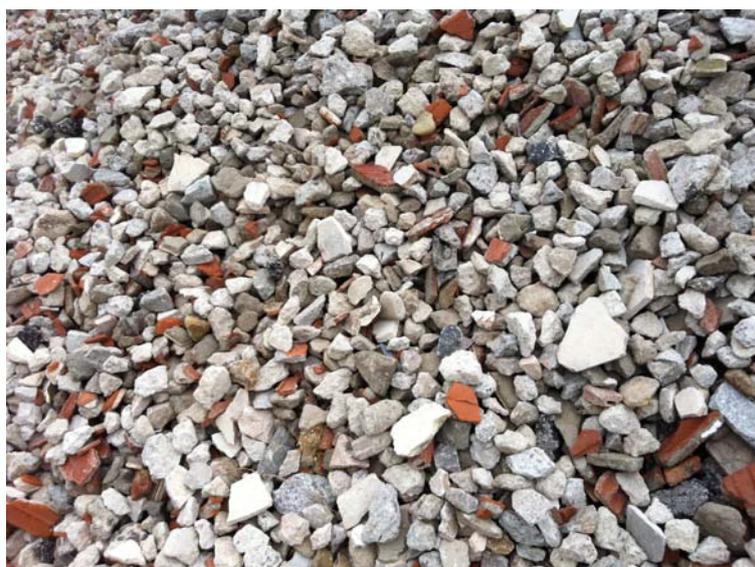


Fig. 5. Aspecto del árido reciclado tras el proceso de trituración.

Así, se contempla la utilización de dos tipos de áridos para la elaboración de hormigones reciclados con ellos. Por un lado, los áridos gruesos reciclados procedentes de hormigón, que pueden ser utilizados tanto para hormigón en masa como para hormigón armado, manteniéndose los criterios de dosificación de los hormigones convencionales. Por otro lado, árido reciclado procedente de residuos mixtos: cerámicos y hormigón. Una de las aplicaciones del árido reciclado mixto es la fabricación de hormigones y morteros. Dada la menor densidad del escombros triturado, estaría, en algunos casos, en la condición de árido ligero, por lo que puede ser de aplicación para la obtención de hormigones ligeros sin finos. El hormigón no ligero fabricado con ladrillo triturado suficientemente denso, se puede utilizar en la construcción de estructuras de hormigón en masa y hormigón armado, tales como: muros de sótano, pilas de hormigón, chimeneas, todo tipo de productos de hormigón armado prefabricado, elementos para tejados, bloques de hormigón o tejas de hormigón según recogen algunos estudios realizados [18]. La resistencia de este tipo de hormigón reciclado disminuye considerablemente en relación con la del hormigón convencional.



Fig. 6. Árido reciclado procedente de hormigón.



Fig. 7. Árido reciclado cerámico procedente de ladrillo.

1.2.2. Normativas internacionales

Actualmente son varios los países que disponen de una normativa específica que regula la utilización de áridos reciclados para la fabricación de hormigones reciclados. A continuación, se enumeran algunas de ellas.

1.2.2.1. RILEM

La RILEM¹ recoge en la guía *"Recycled aggregates and recycled aggregate Concrete"* [19] las características que han de cumplir los áridos reciclados según sea la aplicación que se les pretenda dar. En ella, se establecen limitaciones en cuanto a la densidad mínima del conjunto, estableciendo que menos del 10% de las partículas posean densidades menores de 2,2 g/cm³, y también el porcentaje de partículas con densidad menor de 1,8 g/cm³ se sitúa por debajo del 1%. En el año 1986, se publicaron las recomendaciones para la fabricación de hormigón reciclado "Proposed Recommended Practice for Design and Construction of Concrete Structures Made Using Recycled Aggregate" [20].

La RILEM distingue tres tipos de áridos reciclados: Tipo I, aquellos formados mayoritariamente por residuos cerámicos; Tipo II, aquellos formados por residuos procedentes de hormigón y con un contenido máximo de residuos cerámicos del 10%; Tipo III, los formados en su mayoría, 80%, por áridos naturales siendo el resto áridos de Tipo I o Tipo II.

¹ International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures.

1.2.2.2. Normativas japonesas

La primera propuesta normativa en regular el uso de los áridos reciclados y el hormigón reciclado fabricado con los primeros, se redactó en el año 1977 por la BCS¹. Posteriormente, en el periodo 2005-2007 se publicaron las normas JIS² A 5021, JIS A 5022 y JIS A 5023 [21] que clasifican los áridos reciclados en tres categorías según sus propiedades físicas y químicas.

1.2.2.3. Normativas británicas

El Reino Unido ha sido uno de los primeros países en regular la utilización de los áridos reciclados, catalogando éstos según la procedencia y características del material. La BSG³ 6543 *“Use of industrial by-products and waste materials in building engineering”* [22] de 1995 regula la utilización de residuos industriales en la construcción y *“Recycled Aggregates: BRE⁴ Digest 433”* [23], de 1985 y 1998 respectivamente, clasifican los áridos reciclados.

Otras normativas británicas que hacen referencia a la clasificación y utilización de áridos reciclados y hormigones reciclados son la *“Quality Control: The production of Recycled Aggregates. BR 392”* [24], BS 8500-2:2002: *“Concrete-Complementary British Standard to BS EN 206-1. Part 2: Specification for Constituent Materials and Concrete”* [25] y WRAP⁵ *“Mix Design Specification for Low Strength Concretes Containing Recycled and Secondary Aggregates”* de 2002 [26].

1.2.2.4. Normativa alemana

En Alemania, la norma DIN⁶ 4226-1 *Concrete Aggregate* [27], del año 2000, recoge las categorías de áridos reciclados que pueden ser incorporados al hormigón. Así, hace distinción entre 4 tipos distintos de áridos reciclados: Tipo 1, presentan un porcentaje de árido natural y áridos procedentes de hormigón de más de un 90%; los Tipo 2 sitúan el anterior porcentaje en el 70% siendo, el restante 30% áridos de mortero cerámicos y/o areniscas; Tipo 3, son aquellos que presentan un porcentaje mínimo

¹ Building Contractors Society of Japan.

² Japanese Industrial Standards.

³ British Standard Guide.

⁴ Building Research Establishment.

⁵ The Waste and Resources Action Programme.

⁶ Deutsches Institut für Normung (Instituto alemán para la normalización).

del 80% de árido cerámico y un 20% de áridos naturales y de hormigón; finalmente, el Tipo 4 presenta un contenido de árido procedente de hormigón del 80%, siendo el resto áridos naturales y/o cerámicos.

1.2.2.5. Normativa austriaca

En el año 1992 se redacta por parte de la *Austrian Quality Protection Association for Recycled Building Materials* la guía para la utilización de áridos reciclados en la construcción. En particular, la guía “*Guidelines for Recycled Construction Materials from Building Construction, Application Cement-bonded Substances*” [28] recoge las indicaciones relativas al uso de áridos reciclados procedentes de hormigón.

1.2.2.6. Normativa francesa

La guía “*Guide technique pour l’utilisation des matériaux régionaux d’Ile-de-France: les bétons et produits de démolition recyclés*” [29] recoge desde 1996 las recomendaciones en cuanto a las características del árido reciclado para su utilización en hormigón no estructural.

1.2.2.7. Otras normativas

Otras normativas que hacen referencia al uso de árido reciclado en hormigón son, por ejemplo, en Estados Unidos la ACI¹ Committee 555, *Removal and Reuse of Hardened Concrete* (2001) [30], en Australia la Guía CSIRO² “*Construction and Demolition Waste*” (2000) [31], el Código danés del hormigón “*Use of recycled demolition rubble*” (1989) [32] y “*Recommendations for the use of recycled aggregates for concrete in passive environmental class*” (1990) [33].

En Holanda se encuentra la CUR report nr. 125 “*Crushed Concrete Rubble and Masonry Rubble as Aggregate for Concrete*” [34] que define “Áridos reciclados mixtos”: como un árido que deberá contener un porcentaje mayor del 50% de hormigón con una densidad seca superior a 2,1 g/cm³ y no más del 50% de materiales pétreos reciclados de distinta naturaleza que el hormigón, incluyendo los cerámicos, con una densidad seca mayor de 1,6 g/cm³.

¹ American Concrete Institute.

² Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation

1.2.3. Producción de árido reciclado

La obtención del árido reciclado posee dos fuentes principales, por un lado, los residuos fruto del propio proceso de construcción y, por otro lado, los debidos a la demolición o deconstrucción de estructuras existentes. Independientemente de otros factores, este origen induce distintas características en el árido, fundamentalmente vinculadas al envejecimiento y grado de hidratación del mortero adherido, el cual siempre está presente, en mayor o menor medida, en el árido reciclado procedente del hormigón, [4] y que, como se verá, tiene una gran influencia sobre las propiedades del hormigón reciclado.

Según el PNRCD [1], cuando sea posible, tanto en las plantas de hormigón como en las obras, debe disponerse de espacio y equipos que permitan la separación de los residuos de construcción. En la mayoría de los casos la separación previa es difícil y las cantidades de residuos producidos son pequeñas, por lo que suele ser más común llevarlos a una planta separadora.

La operación de demolición debe considerarse de forma que permita el máximo grado de reutilización de componentes y materiales. La manera de mejorar la calidad del residuo de demolición es la demolición selectiva. Sin embargo, son distintos los factores que condicionan poder llevar a cabo una demolición selectiva; entre éstos pueden reseñarse la accesibilidad, el tiempo disponible y el coste global de la actuación.

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 tiene una clara ocasión de aplicar la demolición selectiva. Asimismo, los costes de transporte y también de vertedero, cuando el vertido esté permitido, juegan a su vez un papel importante. La imposición de restricciones o la aplicación de tasas elevadas al vertido favorecen el reciclaje, e indirectamente, la demolición selectiva.

La demolición selectiva es más cara en comparación con los métodos tradicionales de demolición, por ello, la incidencia del coste de procesado puede ser muy importante respecto a la adopción de uno u otro sistema. Queda claro, pues, que demolición y reciclado deben considerarse conjuntamente.



Fig. 8. *Proceso de demolición de una estructura de hormigón.*

La producción de áridos reciclados se realiza en plantas de tratamiento que son similares a las empleadas con los áridos naturales, si bien incorporan de forma específica elementos para la separación de impurezas y otros contaminantes. Pueden clasificarse, según su capacidad de transporte, en plantas fijas y plantas móviles; las plantas fijas presentan una capacidad de producción del orden de 600 toneladas/hora o más, frente a las plantas móviles, con una producción de 150 a 200 toneladas/hora.

Según datos facilitados por el GERD [3] y por el CEDEX [35], en diciembre de 2006, en España existen 39 plantas fijas o semifijas de reciclado de RCD.

Las plantas fijas son instalaciones permanentes con cintas y elementos transportadores, varias cribas y frecuentemente dos tipos de machacadoras. Los residuos de construcción son transportados hasta estas plantas.

1.2.3.1. Plantas fijas y móviles

Según se recoge en la monografía de ACHE-Hormigón reciclado [4], y gracias a la información facilitada por la planta de reciclado La Palentina [36] pueden describirse dos tipos de plantas de reciclado. Las plantas móviles se llevan hasta el lugar de la demolición: edificio, carretera, etc. En general tienen una única entrada de alimentación, una cinta transportadora, una machacadora y una o dos cribas. Algunas plantas móviles consisten en dos vehículos transportadores: el primero lleva la

machacadora con cintas de alimentación y descarga y el segundo la criba y varias cintas.

A continuación, el residuo mezclado llega en un contenedor. Se descarga sobre el suelo donde las piezas mayores de madera, paredes aislantes o metales pueden extraerse con una grúa. Los grandes bloques se fraccionan con un martillo para conseguir un tamaño más reducido.

Se realiza un precibado del material con anterioridad al proceso de trituración y clasificación, que tiene por objeto realizar un control de tamaño de entrada de materiales al molino primario, separando aquellos de excesiva granulometría de otros más pequeños y aprovechables.

La trituración primaria consta de varios elementos: molino de martillos, separador magnético, cabina de triaje, cribas y cintas transportadoras. Una pala cargadora transporta el hormigón hasta la cinta de alimentación del molino primario, que rompe los bloques por efecto de compresión y cizalladura a través de la acción de martillos. A la salida del molino, un separador magnético separa los elementos metálicos que puedan estar mezclados con el hormigón y no hubieran sido detectados con anterioridad. El material procedente del molino, sale por una cinta y pasa por la denominada cabina de triaje, consistente en un habitáculo elevado, con dos puestos de trabajo donde los operarios, de manera manual, limpian los RCD a la vez que seleccionan los materiales extraídos según su naturaleza separando los plásticos, maderas o metales no detectados con anterioridad por otros separadores automatizados, del resto de RCD.

El árido ya limpio se transporta a través de cinta y es precibado a un tamaño grueso para, después, volver a triturar la fracción mayor por el molino secundario; el resto continúa también mediante otra cinta a la siguiente tolva que dirige el material a una criba de tres paños de la que parten cuatro cintas, formando los acopios correspondientes al tamaño de las fracciones de árido deseadas.

La trituración secundaria consta de cuatro elementos fundamentales: molino de impacto, separadores magnéticos, criba de un paño y cintas transportadoras. El árido con tamaño rechazado en la primera criba de la trituración primaria, se vuelve a triturar en el molino de impacto hasta conseguir la granulometría deseada. Antes y

después del molino se suelen situar dos separadores magnéticos, el primero justo detrás de la salida de la primera criba del proceso de trituración primaria, y el segundo a continuación del molino, con su contenedor correspondiente para la recogida de elementos metálicos. Por último, el árido se clasifica en una criba de un paño, al tamaño deseado.

Tanto en la trituración primaria, como en la secundaria, debajo de cada cinta de salida se acopian los distintos tipos de árido, pudiéndose cargar directamente al camión para su venta, o por el contrario se trasladan al emplazamiento de acopio.

Independientemente de cual sea el procedimiento de machaqueo utilizado, debe tenerse presente que el proceso de demolición debe aportar tamaños individuales que puedan ser aceptados en la planta por un triturador primario¹. Asimismo, este proceso determina también distintas características del árido reciclado como son, entre otras, la forma y distribución de las partículas y la cantidad de mortero adherido. Las machacadoras utilizadas pueden ser: de mandíbulas, de impacto o de conos. Las machacadoras de mandíbulas producen áridos con una buena distribución de tamaños para su utilización en hormigón, ya que el contenido de finos es reducido (menor del 10 %), aunque la forma de las partículas es más angulosa.

Las machacadoras de impacto producen áridos de buena calidad. El principal inconveniente que presentan es que sufren un gran desgaste con los impactos y como consecuencia producen una gran cantidad de finos (hasta un 40%). En las machacadoras de conos el tamaño máximo del árido que admiten es aproximadamente de 200 mm, por lo que son más apropiadas para un machaqueo secundario. En éstas se produce una cantidad media de finos (menor del 20%).

El tipo de machacadora a utilizar depende de tres factores: consumo de energía, coste de producción y calidad del producto. No obstante, por la amplia experiencia en su utilización, la más recomendable es la machacadora de mandíbulas para la trituración primaria debido a su alta capacidad y reducido coste, y de impacto en la trituración secundaria, consiguiendo así una mayor calidad en el árido en base a una mayor eliminación del mortero adherido.

¹ 1200 mm para la mayoría de plantas fijas y de 400 a 700 mm para plantas móviles.

1.2.3.2. Eliminación de impurezas

Un aspecto específico del procesado del árido reciclado respecto al árido natural es el constituido por la eliminación de las impurezas y otros contaminantes [4]. Las técnicas usualmente utilizadas para ello derivan, en gran medida, de su aplicación en la industria minera.

Previamente, durante la demolición, debe evitarse que los escombros de hormigón se mezclen con tierras, y conseguir que se reduzca al máximo el contenido de otros materiales de construcción no deseables, lo cual redundará favorablemente en el sentido de reducir tratamientos posteriores.

Los residuos de demolición incorporan cierta cantidad de impurezas y contaminantes como metales, madera, plásticos, yeso, que deben ser eliminados para su empleo como árido para hormigón, lo cual puede lograrse utilizando distintas técnicas según sea la naturaleza de los mismos.

Los contaminantes de mayor tamaño pueden eliminarse manualmente, mientras que mediante el tamizado se eliminan las impurezas de menor tamaño, como puede ser la tierra, pudiéndose realizar en varias etapas para que resulte más efectivo.

Los residuos de demolición contienen importantes cantidades de acero que puede separarse magnéticamente. La separación tiene lugar justo después del machaqueo, antes de que el acero suelto pueda dañar las cintas transportadoras. El material machacado es transportado por una primera cinta hasta una magneto rotatoria o fija.

Los residuos pueden contener, además, aluminio, cobre, plomo, zinc y, en general, aleaciones no magnéticas. Éstos no magnéticos. En este caso, la forma más moderna de separación es por corrientes de Foucault. Este método se basa en que los metales atraviesen un campo magnético variable que provoca la creación en el metal conductor de las corrientes inducidas de Foucault produciendo la separación por repulsión de los metales no magnéticos y no ferrosos. El material más sencillo de discriminar es el aluminio.

La separación de los materiales de baja densidad puede tener lugar en seco o por vía húmeda. En seco se utiliza la separación manual previa a la mecánica y, posteriormente, para la separación de los materiales ligeros se utilizan potentes

corrientes de aire. Al final de la cinta transportadora, antes de la caída, se aplica una corriente de aire horizontal que arrastra los materiales ligeros.

El hormigón que constituye la materia prima para la obtención del árido reciclado de hormigón debe ser examinado, si es posible, previamente a su procesado. En especial, con respecto a la posibilidad de la presencia de áridos potencialmente reactivos frente a los alcalinos. Debe evitarse también el hormigón de cemento aluminoso y determinarse los contenidos originales de sulfatos y cloruros.

La calidad del árido obtenido depende de la calidad del material procesado y puede contener como principales contaminantes madera, yeso, arcilla, aluminio y plásticos, sin olvidar el vidrio que, según el tipo, puede acarrear una futura reacción álcali-sílice. Asimismo, en el caso de tener conocimiento de procesos patológicos en el hormigón original, éste debe rechazarse como materia prima. En el caso de material procedente de la carretera, el principal problema puede ser el asfalto y algunos contaminantes orgánicos perjudiciales. Es preciso, por tanto, limitar los porcentajes máximos de contaminantes y analizar con la frecuencia debida los áridos obtenidos.

La presencia de yeso debe ser reducida a través de severos criterios de aceptación previa del residuo de demolición, rechazándose la partida que contenga cantidades importantes de tal naturaleza. Además, el material fino ya triturado puede eliminarse con un lavado. En cualquier caso, el control de sulfatos en el árido reciclado resultante debe ser sistemático.

Existen actualmente nuevas tendencias para la eliminación de impurezas, como la separación magnética por densidad. El principio de separación magnética en seco de materiales de mortero y cerámicos se basa en la susceptibilidad magnética de éstos. Existe un dispositivo patentado, llamado Frantz Isodynamic, que puede separar entre 10 μm y 2 mm eficazmente por propiedades para- y dia-magnéticas. Las experiencias efectuadas han permitido separar y obtener ladrillo con una pureza del 93% y mortero con una pureza del 87%.

1.2.3.3. Recomendaciones

Las plantas de producción de áridos reciclados incluyen machacadoras, cribas, mecanismos de transporte y equipos para la eliminación de contaminantes.

La planta de tratamiento debe asegurar unas mínimas distancias de transporte, es decir, situarse lo más cerca posible del centro donde se originan los residuos de construcción y demolición, y donde se da una más amplia demanda de reciclaje de materias primas. También se pueden habilitar zonas de almacenamiento temporal de residuos y pequeñas plantas móviles que pueden emplearse para un tratamiento primario de los mismos.

Los sistemas de procesamiento utilizados dependerán de la aplicación final que se le va a dar al material reciclado y de la cantidad de impurezas que contenga.

Respecto al almacenamiento, resulta de interés seguir las directrices tenidas en la normativa japonesa [37], las cuales se indican a continuación:

- Es aconsejable que los áridos reciclados procedentes de hormigón de distintas calidades se almacenen separadamente. Esto es difícil de conseguir, ya que el control de estos materiales que se suele hacer a la entrada de la planta es puramente visual.
- Almacenar en lugar distinto el árido grueso reciclado y el árido fino reciclado.
- Separar los áridos reciclados de los áridos naturales.
- Dado que la absorción de agua del árido grueso reciclado es elevada, es aconsejable utilizar los áridos en condiciones de saturación. Las tolvas de los áridos pueden estar provistas de aspersores de agua para mantener estas condiciones de humedad.
- Conviene no almacenar los áridos finos durante un largo periodo de tiempo.

1.2.4. Propiedades de los áridos reciclados

1.2.4.1. Naturaleza de los áridos reciclados

La combinación de árido grueso natural y reciclado ha de satisfacer las especificaciones recogidas en el Artículo 28º de la Instrucción española EHE-08 [9]. Además, en el Anejo referente al hormigón reciclado se establecen los requisitos que deben cumplir los áridos gruesos reciclados, así como aquellas especificaciones que

se deben exigir a los áridos naturales para que la mezcla de ambos cumpla los requisitos del Artículo 28°. En este sentido, aunque los áridos reciclados no alcancen los requerimientos mínimos establecidos, la combinación de éstos con árido natural puede amortiguar las pérdidas correspondientes, habiendo que, en este caso, comparar las propiedades del árido mezcla de ambos con las limitaciones establecidas en la Instrucción.

En general, se emplean para los áridos reciclados los métodos de ensayo incluidos en la Instrucción, aunque en algunos casos pueden ser necesarias modificaciones.

En la fabricación de hormigones reciclados se pueden utilizar áridos naturales rodados o procedentes de rocas machacadas.

Se considera que los áridos reciclados obtenidos a partir de hormigones estructurales sanos, o bien de hormigones de resistencia elevada, son adecuados para la fabricación de hormigón reciclado estructural, aunque debe comprobarse que cumplen las especificaciones exigidas en el articulado.

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

- naturaleza del material (hormigón en masa, armado, mezcla de hormigón, etc),
- planta productora del árido y empresa transportista del escombro,
- presencia de impurezas (cerámico, madera, asfalto),
- detalles sobre su procedencia (origen o el tipo de estructura de la que procede),
- cualquier otra información que resulte de interés (causa de la demolición, contaminación de cloruros, hormigón afectado por reacciones álcali-árido, etc).

Se debe establecer acopios separados e identificados para los áridos reciclados y los áridos naturales.

Es aconsejable que los áridos reciclados procedentes de hormigones de muy distintas calidades se almacenen separadamente, debido a que la calidad del hormigón de origen influye decisivamente en la calidad del árido reciclado,

obteniéndose áridos con mejores propiedades a partir de hormigones de buena calidad. Una posible distinción puede ser almacenar en acopios separados los escombros procedentes de hormigón estructural o de elevada resistencia y los procedentes de hormigones no estructurales, permitiendo así una mayor uniformidad en las propiedades de los áridos producidos.

1.2.4.2. Propiedades geométricas de los áridos reciclados

La obtención de las características geométricas adecuadas es un problema tecnológico que las plantas de producción de árido reciclado pueden afrontar con facilidad. Así, los áridos reciclados deben presentar un contenido de desclasificados inferiores menor o igual al 10% y un contenido de partículas que pasan por el tamiz de 4 mm no superior al 5%.

El contenido de desclasificados inferiores del árido reciclado suele ser superior al de los áridos naturales, como ya se ha comentado, debido a que éstos pueden generarse después del tamizado, durante el almacenamiento y transporte, por su mayor friabilidad. Además, la fracción fina reciclada se caracteriza por presentar un elevado contenido de mortero, lo cual origina unas peores propiedades que afectan negativamente a la calidad del hormigón. Esta es la principal causa de restringir su uso en la aplicación de hormigón estructural.

La granulometría de los áridos reciclados varía según el proceso de trituración que se realice, pudiéndose seleccionar mediante pequeños ajustes en la apertura de las machacadoras. Las machacadoras de impacto son las que reducen en mayor medida el tamaño de las partículas y producen mayor cantidad de finos, seguidas de las machacadoras de cono y las de mandíbulas. El porcentaje de árido grueso que se obtiene suele variar entre 70% y 90% del árido total producido. Este porcentaje depende además del tamaño máximo del árido grueso reciclado producido y de la composición del hormigón original. La fracción gruesa posee una curva granulométrica adecuada, que se puede englobar dentro de los husos granulométricos que recomiendan algunas normas internacionales para el empleo de árido grueso en hormigón estructural. En general, las granulometrías de los áridos reciclados se sitúan dentro de lo que fijan las diferentes recomendaciones tanto para

árido natural como para el árido reciclado, tal y como indica la Comisión 2 del Grupo de trabajo 2/5 "Hormigón Reciclado" [4].

La Fig. 9 recoge una comparativa de los husos granulométricos de las normas europea UNE-EN 12620:2003+A1:2009 "Áridos para hormigón" [38] para los tamaños máximos de 20 y 31,5 mm, japonesas (JAPÓN) [39] para los tamaños máximos 40, 25 y 20 mm y, finalmente, belgas (BELGA) [40] para los tamaños máximos de 20 y 32 mm.

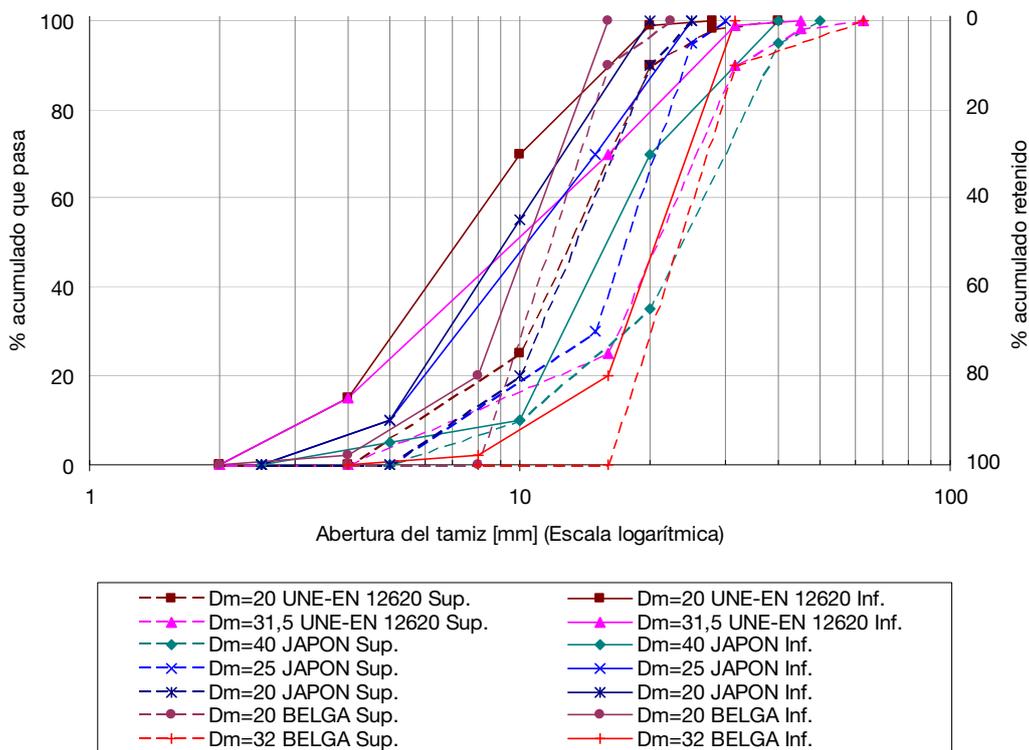


Fig. 9. Representación conjunta de las curvas de los husos granulométricos para distintos tamaños máximos de árido, límites superior e inferior, de las normas consultadas.

1.2.4.3. Porcentaje de finos

El árido reciclado genera finos durante su manipulación debido a la aparición de pequeñas partículas de mortero desprendidas. Según algunos ensayos españoles [41] la generación de finos sobre fracciones gruesas ya clasificadas en el laboratorio puede variar entre 0,2% y 1,2%, situándose en la mayoría de los casos por debajo del límite del 1% del árido grueso establecido por la EHE.

La presencia de partículas finas en la superficie del árido reciclado puede originar problemas de adherencia entre éste y la pasta de cemento, además de provocar un aumento en la cantidad de agua de amasado necesaria [42].

Las recomendaciones o normas que incluyen especificaciones sobre esta propiedad, norma belga [40], inglesa RILEM [19], norma Alemana [27] y recomendaciones japonesas [37], establecen un límite más alto de finos para el árido reciclado, admitiendo entre un 2% y un 5%, favoreciendo así el cumplimiento de esta especificación.

Después de obtener la fracción gruesa en el árido reciclado, éste sigue presentando pequeños porcentajes de arena (partículas menores de 4 mm) debido a la disgregación que sufre el árido al manipularse. La Instrucción EHE admite para el árido convencional hasta un 10% de desclasificados inferiores, entre los que podrían contabilizarse también estas partículas de arena generadas en la manipulación para el caso del árido reciclado. El porcentaje de desclasificados admisible en el árido reciclado debe ser inferior, debido al efecto perjudicial que ocasiona en las propiedades del hormigón, como se comentará más adelante.

Así, las recomendaciones de la RILEM y las especificaciones de Hong Kong para la utilización de árido reciclado, establecen un límite del 5% para el contenido de partículas de tamaño inferior a 4 mm en el árido grueso reciclado.

1.2.4.4. Forma y textura superficial

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 aquéllos.

El coeficiente de forma del árido reciclado es similar al que puede presentar el árido natural. Sin embargo, los estudios que han empleado el método del índice de lajas para determinar la forma del árido grueso han encontrado diferencias entre el árido natural y el árido reciclado, siendo menor el valor del índice de lajas en el caso del árido reciclado. Esto puede deberse a que el mortero que queda adherido en las caras planas que presentan las partículas tiende a aumentar el espesor de las partículas con forma de laja, disminuyendo así el porcentaje de lajas. Este porcentaje

puede situarse en el intervalo del 7-9%, cumpliendo el límite de 35% que establece la EHE.

Las partículas del árido reciclado presentan una forma más redondeada [43]. Sin embargo, otros estudios, que han valorado la forma del árido a través del índice de angulosidad, concluyen que las partículas del árido reciclado son más angulosas [44]. Esta disparidad en resultados y conclusiones de diferentes estudios puede deberse a la influencia de la calidad del hormigón de origen sobre la forma, ya que los áridos reciclados tienden a ser más redondeados cuanto mayor es la relación agua/cemento del hormigón original y, por lo tanto, menor la resistencia del mortero adherido.

En general, son las fracciones de menor tamaño del árido grueso las que presentan una forma más desfavorable, tanto utilizando como referencia el coeficiente de forma como el índice de lajas.

1.2.4.5. Propiedades físicas y mecánicas del árido reciclado

La densidad del árido reciclado es inferior a la del árido natural, debido a la pasta de cemento que queda adherida la cual es siempre de menor densidad que el árido natural comúnmente utilizado según la bibliografía consultada. La densidad del árido reciclado suele oscilar entre 2,1 y 2,4 g/cm³ mientras que la densidad saturada con superficie seca varía entre 2,3 y 2,5 g/cm³ [45-48], por lo que, en todos los casos,, se pueden considerar estos áridos de densidad normal (no ligeros), por presentar una densidad superior a 2 g/cm³ según establece la norma UNE 146121:2000 “Áridos para la fabricación de hormigones. Especificaciones para los áridos utilizados en los hormigones destinados a la fabricación de elementos de hormigón estructural” [49].

La mayor diferencia con respecto al árido natural es debida a la elevada absorción de la pasta que queda adherida a él. Los valores habituales de absorción están comprendidos entre 4-10%, incumpliendo, en la mayoría de los casos, el límite del 5% que establece la EHE-08 [9].

Entre las fracciones más pequeñas se encuentran las partículas de menor densidad y una mayor absorción (para un mismo hormigón de origen) que entre las fracciones más gruesas, debido a la mayor concentración de pasta endurecida.

Los hormigones de baja relación agua/cemento (y por lo tanto de elevada resistencia), suelen dar lugar a áridos reciclados de mayor calidad, elevada densidad y menor absorción. Los estudios realizados [45-48] 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), dependiendo del tipo de procesado, porque en la realización de 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 próximos a los del árido natural.

Todas las normativas estudiadas establecen límites más tolerantes a la absorción del árido reciclado, que van desde el 6% que establece la *“Guía Australiana para la Utilización de Árido Reciclado para Hormigón”* [31] hasta el 10% que establece la RILEM [19,20]. La densidad mínima se limita, también, entre 2,0 g/cm³ (RILEM) y 2,2 g/cm³ en el borrador de la norma japonesa *“Uso de árido reciclado y hormigón reciclado”* [39].

En esta última, se distinguen dos grandes grupos: uso en obra civil y uso en edificación. Dentro de ellos se establece la clasificación del árido en función de aplicaciones más concretas. El árido tipo 1 es el de mayor calidad y se puede emplear en hormigón en masa o armado con fines estructurales, mientras que el árido tipo 2 es adecuado para hormigón en masa o losas de hormigón y el tipo 3 para hormigones pobres.

Para los Tipo I y II, recogidos en la RILEM, 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 se pueden emplear en hormigón en masa y en hormigón armado. Para el árido Tipo III no se establece limitación alguna a la resistencia del hormigón y para el árido Tipo II se limita la clase resistente a H-50 (50 MPa de resistencia a los 28 días), siempre que se

cumplan los requisitos adicionales de durabilidad cuando el hormigón vaya a estar expuesto a ambientes agresivos.

Las especificaciones belgas para el empleo del árido reciclado son muy similares a las recomendaciones de la RILEM, estableciendo una clasificación del árido reciclado en dos grupos, GBSB-I¹ y GBSB-II². 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. 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 del árido como en la calidad del hormigón reciclado. La norma japonesa es la más restrictiva de las tres, ya que admite un valor máximo de la absorción del 7% y establece, además, una clasificación más detallada del árido reciclado, llegando a exigir hasta un límite máximo de absorción del 3% para aplicaciones estructurales.

La norma británica BS 8600:02 "*Specification for constituent materials and concrete*" [50] 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 se prescribe que el árido obtenido a partir de una combinación de árido natural y árido reciclado debe cumplir las especificaciones generales que se establecen para el árido natural. Se acota, además, el contenido máximo de impurezas. En esta norma se recogen, conjuntamente, las limitaciones para el empleo de hormigón reciclado en cuanto a resistencia y clase ambiental de exposición, similares a las establecidas en la norma belga aunque con valores menos exigentes para el árido procedente de hormigón en ambos casos.

¹ GBSB-I: Áridos procedentes de residuos cerámicos.

² GBSB-II: Áridos procedentes en su mayoría de escombros de hormigón.

La norma alemana (DIN 4226) [27], por su parte, define cuatro categorías de árido reciclado, en función también de la composición del mismo:

- **TIPO 1:** Áridos procedentes en su mayoría de escombros de hormigón o áridos minerales, con un contenido máximo de clinker, ladrillo y/o arenisca calcárea del 10%.
- **TIPO 2:** Áridos procedentes en su mayoría de escombros de hormigón o áridos minerales, con un contenido máximo de clinker, ladrillo y/o arenisca calcárea del 30%.
- **TIPO 3:** Áridos procedentes en su mayoría de escombros cerámicos, con un contenido máximo de materiales procedentes de hormigón o áridos minerales del 20%.
- **TIPO 4:** Áridos procedentes de una mezcla de residuos de construcción y demolición (RCD) con un contenido mínimo del 80% de material procedente de hormigón, áridos minerales o productos cerámicos.

Para los áridos procedentes mayoritariamente de hormigón (Tipo 1 y Tipo 2) la máxima absorción permitida es del 10% y 15%, respectivamente. En ambos casos, la densidad mínima exigida es $2,0 \text{ kg/m}^3$. Esta norma, a diferencia del resto, establece especificaciones para la absorción de agua después de 10 minutos. Este hecho, junto con los elevados valores prescritos, hace de esta norma la menos restrictiva en términos de coeficiente de absorción del árido reciclado.

De forma general, la normativa alemana contempla el empleo de hasta un 5% en peso de árido reciclado sobre el total de áridos, sin establecer restricciones adicionales al hormigón. Para porcentajes mayores se establecen distintos usos en función del ambiente al que vaya a estar sometido el hormigón.

Estudios españoles [4,51-58] indican que un límite recomendable para la absorción del árido reciclado sería del 7%. Este límite selecciona áridos reciclados de mayor calidad, que, además, van a presentar menor coeficiente de los Ángeles, menor contenido de finos y de partículas ligeras procedentes de mortero poroso.

En el Anejo de la Instrucción EHE-08 se mantienen las especificaciones relativas al contenido de partículas de bajo peso específico y contenido de partículas blandas, el contenido de terrones de arcilla de éste no será superior al 0,6%, y el del árido grueso natural no superior al 0,15% para los áridos reciclados mezclados con naturales al 20%. En el caso extremo de utilizar un 100% de árido grueso reciclado, éste debe cumplir la especificación máxima del 0,25% de terrones de arcilla.

El límite que establece la Instrucción para el contenido de partículas blandas se mantiene, para los áridos reciclados, aunque se deberá adaptar el método de ensayo actual con el criterio de realizar el ensayo únicamente sobre la parte de árido natural de las partículas y no sobre el mortero adherido a las mismas.

En el hormigón reciclado con un contenido de árido reciclado no superior al 20%, éste debe presentar una absorción no superior al 7%. Adicionalmente, el árido grueso natural debe manifestar una absorción inferior al 4,5%.

En hormigones reciclados con más del 20% de árido reciclado, la combinación de árido grueso natural y reciclado debe cumplir la especificación que establece la Instrucción, presentando un coeficiente de absorción no superior al 5%.

Como control rápido en la planta de producción, que permite estimar la absorción del árido reciclado, se puede realizar un ensayo de absorción a los 10 minutos, que debe arrojar resultados inferiores al 5,5% para sustituciones de árido reciclado no superiores al 20%.

En el caso de hormigones sometidos a ambientes de helada, para determinar la pérdida de peso máxima experimentada por los áridos reciclados al ser sometidos a ciclos de tratamiento con soluciones de sulfato magnésico, se debe realizar una preparación previa de la muestra, que consiste en un lavado y tamizado enérgico por el tamiz de abertura 10 mm, para eliminar todas las partículas friables, previamente al procedimiento de ensayo descrito en la norma UNE-EN 1367-2:99 "Ensayos para determinar las propiedades térmicas y de alteración de los áridos. Parte 2: Ensayo de sulfato de magnesio" [59]. El límite al resultado del ensayo que establece la Instrucción para los áridos naturales se aplica, también, a los áridos gruesos reciclados.

En cuanto a los requisitos químicos, se mantienen las especificaciones del Articulado relativas al contenido de cloruros, y contenido de sulfatos para áridos de hormigón. Los áridos reciclados pueden incorporar impurezas y contaminantes que influyen negativamente en las propiedades del hormigón. Estas impurezas producen en todos los casos un descenso en las propiedades del hormigón. Además, y dependiendo del tipo de impureza, se pueden presentar otros problemas como reacciones álcali-árido (vidrio), ataque por sulfatos (yeso), desconchados superficiales (madera o papel), elevada retracción (tierras arcillosas) o mal comportamiento hielo-deshielo (algunos cerámicos).

Se debe controlar en el árido reciclado el contenido de impurezas, estableciendo los valores máximos recogidos en el propio anejo.

Se advierte que los áridos reciclados pueden presentar un contenido importante de cloruros, en función de la procedencia del hormigón usado de origen, especialmente en hormigones procedentes de obras marítimas, puentes o pavimentos expuestos a las sales para el deshielo. Asimismo, los hormigones en los que se hayan utilizado aditivos acelerantes pueden, también, contener una elevada cantidad de cloruros. Por ello, se recomienda en la Instrucción determinar el contenido de cloruros totales en vez del contenido de cloruros solubles en agua, aplicando el mismo límite que establece la Instrucción para este último. Esto es debido a la posibilidad de que haya ciertos cloruros combinados que, en determinadas circunstancias, puedan ser reactivos y atacar a las armaduras.

Para hormigón reciclado con un porcentaje de árido grueso reciclado no superior al 20%, se pueden utilizar las fórmulas del articulado para el cálculo de la resistencia a tracción. Para porcentajes de sustitución mayores del 20% esta propiedad se ve poco afectada, aunque se recomienda la realización de ensayos en cada caso.

1.2.4.6. Mortero adherido al árido reciclado

La principal diferencia que presenta el árido grueso reciclado es que éste posee una cierta cantidad de mortero adherido. Este mortero es el causante de las diferencias que existen entre las propiedades de un árido natural y un árido reciclado antes mencionadas: menor densidad, mayor absorción, susceptibilidad a las heladas, reacción álcali-árido y ataque de sulfatos, entre otros. Estas propiedades afectan, a

su vez, a las del hormigón: módulo de elasticidad, retracción, fluencia y problemas asociados a la durabilidad. Cuanto mayor es el contenido de mortero adherido que presenta el árido reciclado, más lo acusará el hormigón fabricado con él.

La variación en los resultados del mortero adherido obtenidos de un estudio a otro es grande, y puede estar muy influenciada por el procedimiento de ensayo utilizado para su determinación, ya que no existe procedimiento normalizado.

En las fracciones más gruesas, 10-20 mm, los valores habituales oscilan entre el 23-52%, mientras que, en la fracción más fina, 5-10 mm, el rango puede ascender hasta 32%. Se observa que es la fracción más pequeña la que presenta mayores porcentajes de mortero y, por tanto, esto repercute en unas peores propiedades. Según los ensayos realizados, la resistencia del hormigón original apenas influye en la cantidad de mortero adherido al árido grueso, obteniéndose generalmente valores ligeramente superiores en áridos procedentes de hormigones de mayor resistencia (menor relación agua/cemento) [41,43,58].

Mediante sucesivos procesos de trituración, se puede llegar a conseguir un árido de buena calidad, ya que se puede reducir considerablemente la cantidad de mortero adherido.

1.3. GENERALIDADES DEL HORMIGÓN

1.3.1. Introducción

A medida que la sociedad evoluciona, se hace cada vez más necesario un profundo conocimiento acerca del material sobre la que está cimentada, el hormigón. En la actualidad, el hormigón es el material, de entre todos de los que hace uso el ser humano, más utilizado, superando ampliamente a cualquier otro. Ningún material ha tenido tan buena aceptación y rápido desarrollo tecnológico como lo ha tenido este. Se estima que el gasto anual mundial de hormigón por persona ronda actualmente la nada despreciable cifra de 1 m³, más de 2 toneladas, aumentando considerablemente año tras año. Todo esto, hace presagiar que este noble material seguirá siendo, como viene haciéndolo desde principios del siglo XX, uno de los más importantes y representativos de la sociedad desarrollada [60].

La etimología de la palabra hormigón suscita controversia, ya que, distintas fuentes atribuyen a la palabra orígenes, también, diferentes.

Según la Real Academia Española [61], “Hormigón” tiene su origen en el término “hormigo” (originalmente “formigò”) o bizcocho preparado con almendras enteras, en unas ocasiones y en algunas zonas, con avellanas en otras, harina, leche y huevos. Parece ser que los áridos gruesos, componente básico del hormigón, recuerdan a los frutos secos de este postre, así como el mortero que los une recuerda al propio bizcocho.

El historiador Plinio dejó constancia de los “Paries formaceus” de donde derivaría la palabra “hormazo” que significa “molde o forma”. No obstante, los vocablos francés “Béton” y el alemán “Beton” sí que derivan del latín “bitumen/bituminis” que significa “lodo que se iba espesando” y también, el vocablo inglés “concrete” y el italiano “calcestruzzo” provienen del latín y significan denso o compacto.

Entre las definiciones que se han hecho en España sobre el concepto de hormigón, encontramos en el año 1734, una de las primeras [62]. Ésta se enuncia literalmente como sigue: “Cierta argamasa compuesta de piedras menudas, cal y betún: la cual es tan fuerte y sólida que dura siglos, y tan firme como la piedra”. Podemos apreciar cierta discrepancia con lo que actualmente se entiende por hormigón. Sin embargo, a

medida que el material evoluciona, también lo hace su definición. Así, en el año 1803 se sustituye la palabra argamasa por la de mezcla. Esta especificación se mantiene hasta el año 1884, pues es entonces cuando se introduce el novedoso término de “mortero”. También se sustituye la palabra betún y se amplía la definición con un nuevo vocablo: hormigón hidráulico (“Aquel cuya cal es hidráulica”).

En 1914, se incluye en el diccionario [61] la variedad de hormigón armado: “Fábrica hecha con hormigón hidráulico sobre una armadura de barras de hierro o acero”. Hasta el año 1970, la definición que hacía la Academia solo contemplaba el hormigón hecho con mortero fabricado en base a cal. No obstante, a partir de ese año, la palabra cal se sustituye por la de Cemento, quedando como definición de hormigón la misma que podemos encontrar hoy: “hormigón: (De hormigo, gachas de harina). 1. m. Mezcla compuesta de piedras menudas y mortero de cemento y arena”.

A pesar de lo ilustrado en los diccionarios, las definiciones que nos proporcionan no son lo suficientemente técnicas como para poder entender la importancia y complejidad de este material.

Se propone, por lo tanto, una interpretación más descriptiva y, sobre todo, más actual: *el hormigón es el material compuesto que se obtiene a partir de la mezcla de una matriz de cemento, endurecido por hidratación, junto con áridos de distintos diámetros máximos o granulometrías formando un esqueleto resistente*. La mezcla endurecida de cemento con árido fino o arena (de diámetro no mayor que 4 mm) recibe el nombre de mortero y es la base o matriz del hormigón. Los áridos gruesos, que pueden ser de distintos diámetros máximos, se distribuyen homogéneamente en el seno de la matriz de mortero y proporcionan al hormigón propiedades que no posee por sí misma la pasta de cemento.

El desarrollo que ha tenido el hormigón a lo largo de la historia es paralelo a la evolución del cemento. Sin embargo, todos los hormigones mantienen como denominador común el árido rocoso, ya sea calizo, silíceo o de algún otro tipo, según la disponibilidad en las diferentes regiones donde se fabrique el hormigón, lo cual viene haciéndose desde hace ya miles de años, tal y como lo demuestran los yacimientos encontrados.

Los vestigios más antiguos de los que hay constancia, acerca de la utilización este material, datan de hace más de 14.000 años, los cuales fueron descubiertos en el Este de la actual Turquía. Allí se han localizado muros hechos con un material muy parecido a lo que hoy entendemos como hormigón, utilizando piedras a manera de árido y mortero de cal como conglomerante, así como, herramientas para su empleo y aplicación. Más recientemente, la antigua población de Lepenski, en Centroeuropa, utilizaba hace 7.500 años el hormigón para recubrir y aislar el suelo de las viviendas. Hace 4.500 años, los egipcios utilizaron yeso cocido como conglomerante para la construcción de la famosa pirámide de Keops. También en la Grecia de hace 2.300 años se utilizaron morteros fabricados a partir de tierra volcánica extraída de la isla de Santorini [60].

Tal y como recoge la ACI en su publicación en “History of Concrete” [63], la historia del hormigón puede dividirse en tres etapas fundamentales. La primera, fue aproximadamente hace 2200 años en Roma. En esta época comenzó a utilizarse, como aglomerante del hormigón, el cemento. Éste se elaboraba utilizando rocas puzolanas de origen volcánico, es decir, materiales silíceos que por sí solos no poseen valor cementante, pero que cuando se han dividido finamente y están en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes. De esta manera se dio un importante impulso a la aplicabilidad de este material, ya que mediante estas técnicas se consiguió aumentar notablemente la resistencia y durabilidad de las construcciones. El teatro de Pompeya (año 55 a. C.) y la basílica de Constantino (año 323) fueron construidos utilizando éste procedimiento [64].

Tras una larga época en la que el hormigón cayó en desuso, el descubrimiento del cemento Pórtland, a mediados del siglo XVIII, fue el impulsor necesario para que la utilización del hormigón como elemento constructivo se convirtiera en una realidad. En 1756, John Smeaton descubrió que las calizas impurificadas con grandes cantidades de arcilla proporcionaban al mortero conocido hasta entonces unas mejores cualidades. James Parker patentó en 1796 el “cemento romano”, obtenido por calcinación de nódulos de cal y altos contenidos de arcilla. Sin embargo, fue Vicat, quien en 1817, sentó las bases científicas del estudio del cemento, publicando “Recherches Experimentales”, pauta a seguir en la fabricación del cemento por medio de mezcla de calizas y arcillas dosificadas en unas proporciones adecuadas y molidas

conjuntamente. Este sistema fue tan revolucionario que se sigue empleando en la actualidad.

La patente del 21 de Octubre de 1824 para la fabricación del cemento Pórtland, que recibe su nombre por el parecido de éste con la piedra de la región de Pórtland (Inglaterra), se debe a Joseph Aspdin. “El barro o polvo de las calles empedradas con piedra calcárea o, en caso de que este material no se pueda obtener en suficiente cantidad, la piedra calcárea calcinada, se mezcla con una determinada cantidad de arcilla, amasada con agua, por medio del trabajo manual o a máquina, hasta reducirla a un limo impalpable. La pasta se deja secar, luego se trocea y se calienta en un horno de cal, hasta que se haya desarrollado todo el ácido carbónico; después se reduce el producto a polvo con muelas y morteros y ya está listo para el uso”.

Posteriormente, en 1844, Isaac Charles Johnson consigue alcanzar temperaturas suficientemente altas como para lograr el clinkerizado de la mezcla de caliza y arcilla, obteniendo, lo que se puede considerar, el primer cemento moderno. Con esta idea mejoró las dosificaciones y aumentó las temperaturas de cocción hasta lograr la sinterización de la mezcla.

Otra gran revolución vino de la mano de Joseph Monier, quien basándose en los estudios de Lambot, de 1845, acerca de la utilización del acero como refuerzo del hormigón, entendió y aprovechó la gran importancia que tenía y tiene esta nueva combinación. El hormigón es un material que posee una extraordinaria resistencia a la compresión, sin embargo, por sí solo no es capaz de resistir grandes cargas efectuadas a tracción o a cortante. La introducción de barras o mallas de acero en el seno del hormigón resuelve este inconveniente. Monier, jardinero de profesión, comienza a construir jardineras de cemento reforzado con alambres de acero para, finalmente en 1875, hacer una de las aportaciones más relevantes de la historia a la construcción: el primer puente con hormigón armado en Chazalet (Francia) con una luz de 16,5 metros y 4 m de ancho. También patenta tuberías (1868), paneles (1869), puentes (1873), escaleras (1875), vigas (1878) y cubiertas (1880). A pesar de ello, el hormigón armado no alcanza aún toda la popularidad que se le podía pronosticar.

No obstante, al mismo tiempo que Monier trabajaba en la tecnología del hormigón armado, en 1870, Michaelis propone la “Teoría coloidal del fraguado del cemento”.

Consideró que los silicatos hidratados precipitan en forma de gel que va rellenando los huecos existentes entre los cristales formados en la hidratación, dando lugar al endurecimiento de la pasta, a la vez que se va cediendo agua para continuar la hidratación de los otros componentes anhidros. Por otro lado, en 1893 Le Chatelier amplía el conocimiento científico del cemento aportando su “Teoría cristaloides del fraguado del cemento”, observando la importancia del silicato y aluminato tricálcicos en la resistencia del cemento hidratado, así como la baja hidraulicidad del silicato bicálcico. Ambas teorías cimentan las bases de la “Teoría de la Hidratación”.



Fig. 10. Rotura a compresión de una probeta cilíndrica normalizada de hormigón donde puede apreciarse cómo la rotura se ha propagado formando un cierto ángulo a través de la zona de menos resistencia: sollicitación a cortante.



Fig. 11. Detalle del montaje y distribución de las armaduras de acero antes de su recubrimiento mediante hormigón. El entramado de barras de acero aumentará considerablemente la resistencia a tracción y cortante del hormigón que será utilizado en la construcción.

La popularidad que necesitaba el hormigón, la adquiere cuando, en 1884, Gustav Adolf Wayss, de Berlín, adquirió las patentes de Monier para el norte de Alemania y Conrad Freytag se hizo con la patente para el sur.

Wayss realizó numerosos experimentos de resistencia en las bóvedas de Monier, bajo la supervisión científica de Mathias Könen, publicando, en 1886, los resultados bajo el título “Das System Monier in seiner Anwendung auf das gesamte Bauwesen” o “El sistema Monier en su aplicación a todo tipo de construcciones” también conocido como “Folleto Monier”, alcanzando gran difusión, favoreciendo la autorización de este tipo de construcciones por parte de la administración e introduciendo las bases del primer código del Hormigón Armado, publicado en Suiza, en 1903, con el título: “Provisorische Normen für Projektierung, Ausführung und Kontrolle von Bauten in armierten Beton” o “Normativa provisional para proyecto, ejecución y control de construcciones de hormigón armado”.

A partir de este momento, el número de construcciones, así como la relevancia de ellas, es incalculable. Destaca entre ellas la primera cubierta laminar o cáscara de hormigón, la “Cúpula de Jena” de 40 m de luz y 6 cm de espesor. Con una relación luz/espesor de más de 600 y por consiguiente, superior a la de la cáscara de un huevo, que fue diseñada en 1924, por Walther Bauersfeld.



Fig. 12. Fotografía realizada durante la construcción de la Cúpula de Jena del año 1922.

En 1939 tiene lugar la Primera Instrucción en España, titulada: “Instrucción para el proyecto de las obras de hormigón armado” [65].

Actualmente, la importancia y ventajas del hormigón en la construcción son incuestionables. Ello es debido, en gran parte, a que se trata de un material totalmente conformable, que permite conseguir piezas sólidas, muy resistentes y de cualquier tamaño o forma. Además, los materiales que se requieren para su fabricación se encuentran entre los más abundantes de la litosfera.

1.3.2. Estructura del hormigón

Según el tamaño de las magnitudes que estudiemos, podremos distinguir dos tipos de estructura: la macroscópica y la microscópica. La primera de ellas es la que corresponde a elementos que son visibles directamente al ojo humano o mediante una lente de pocos aumentos y la segunda a los que son tan pequeños que solo pueden ser observados mediante la utilización de instrumental adecuado. El límite que separa estos dos tipos de estructuras se sitúa en torno a los 200 μm .

Desde el punto de vista macroscópico, pueden distinguirse claramente dos fases. Por un lado están los áridos y, por otro, la pasta de cemento hidratada (hydrated cement paste) o HCP.

Los áridos pueden ser de mayor o menor tamaño y diversas formas, suelen tener un tamaño comprendido entre 0 y 100 mm, tener naturaleza inorgánica y procedencia natural o artificial.

La Instrucción Española del Hormigón distingue solamente dos tipos de áridos. Los áridos finos, aquellos suficientemente pequeños como para poder pasar por el tamiz de 4 mm de abertura y áridos gruesos para el resto. No obstante, cabe hacer subdistinciones para cada una de las anteriores. La mayoría de los hormigones están fabricados con tres tipos de áridos: arena (grano menor de 4 mm); gravilla (grano entre 4 y 16 mm) y gravas (grano mayor de 16 mm). Los áridos desempeñan un papel decisivo en la estabilidad de volumen, resistencia y economía de los hormigones.

La arena, es el árido de menor tamaño. Tradicionalmente se han utilizado arenas naturales, recogidas de los ríos y/o playas; sin embargo, hoy en día, la mayoría proceden del machaqueo de piedras extraídas de las canteras. El tamaño, con una distribución de grano de en torno a 1 mm, se encuentra entre los 0,125 y 4 mm de diámetro.

A nivel microscópico, se manifiesta la complejidad de la estructura y se revela la no homogeneidad de las dos fases ÁRIDO y HCP. Por ejemplo, en algunas áreas, la masa de HCP parece ser tan densa como el árido, mientras que en otras presenta elevada porosidad. También, si se examinan muestras de hormigón dosificadas con la misma cantidad de cemento pero con diferente contenido de agua, para distintos grados de madurez, se observará, en general, que el volumen de poros capilares en la HCP decrece con la disminución de la relación agua/cemento o con el incremento del tiempo de hidratación.

La estructura de la HCP en la vecindad de los áridos gruesos es muy diferente a la del resto del sistema. De hecho, muchos aspectos del comportamiento mecánico del hormigón sólo pueden explicarse cuando la interfase HCP-áridos se trata como una tercera fase de la estructura del hormigón. Así, las características de la estructura del hormigón se pueden resumir de la siguiente forma:

- Primero, se distinguen tres fases, árido, HCP y zona de transición, que no es otra cosa que la región comprendida entre el árido y la HCP. Existe una típica corteza delgada de 10 a 50 μm de espesor alrededor del árido grueso, “la zona de transición”, generalmente, más débil que los otros dos componentes del hormigón y que, por ello, ejerce una gran influencia en el comportamiento mecánico del mismo.
- Segundo, cada una de las tres fases es en sí misma multifase. Por un lado, tanto la zona de transición como la matriz de la HCP contienen una distribución heterogénea de diferentes tipos y cantidades de fases sólidas, poros y microfisuras y, por otro, cada partícula de árido puede presentar en su composición varios minerales además de microfisuras y poros propios.
- Tercero, a diferencia de otros materiales de ingeniería, la estructura del hormigón no permanece estable. Tanto la HCP como la zona de transición están sujetas a evoluciones en el tiempo, propiciadas por la humedad ambiente y la temperatura.

La gran heterogeneidad de la estructura del hormigón y su naturaleza dinámica son las principales razones por las cuales los modelos de correlación entre propiedades y estructura han resultado, hasta ahora, de poca utilidad en este caso. A pesar de ello,

el conocimiento de las características de las fases del hormigón facilita la comprensión de las propiedades de éste [60].

1.3.3. El árido en el hormigón

El árido es el responsable principal de la densidad, del módulo de elasticidad y de la estabilidad dimensional del hormigón. Por esta razón, en los áridos son más importantes sus propiedades físicas como, por ejemplo, volumen, tamaño y distribución de los poros, que sus propiedades químicas o mineralógicas que, aunque influyen, pasan a un segundo plano.

Además de por la porosidad, las propiedades del hormigón se ven afectadas por la forma y textura de los áridos. Generalmente, los áridos naturales de río son redondeados y lisos. Los procedentes de machaqueo son rugosos e irregulares y, dependiendo del tipo de roca y equipos utilizados para su trituración, pueden contener una proporción considerable de partículas delgadas y alargadas, que afectan adversamente al hormigón.

En general, el árido es el elemento más resistente y abundante de los que componen el hormigón y, por ello, no influye directamente en su resistencia ya que las regiones más débiles, y que van a condicionar ésta, son otras. No obstante, si el árido es poco resistente o, al menos, menos resistente que la HCP (como en el caso de la piedra pómez o incluso los áridos calizos cuando se utilizan en hormigones de altas prestaciones), puede afectar negativamente a la misma. El tamaño y la forma de los áridos gruesos pueden tener una influencia indirecta en la resistencia del hormigón; los áridos grandes con formas alargadas, aciculares o laminares, tienden a formar películas de agua alrededor de ellos, de forma que a estas zonas no les llega pasta de cemento y el árido queda sólo parcialmente unido al sistema. A este fenómeno se le denomina exudación interna aunque debido a la alta absorción del árido reciclado, no tendrá efecto sobre el hormigón reciclado.

A lo largo de esta Tesis se intentará explicar desde el punto de vista del árido, especialmente cuando éste es reciclado, la influencia que sus especiales características ejercen sobre el hormigón fabricado con él.

1.3.4. La matriz o pasta de cemento hidratada

El cemento portland anhidro es un polvo de partículas angulares y tamaños comprendidos entre 1 y 50 μm . Se compone, esencialmente, de silicato tricálcico en proporciones entre el 45 y el 60%, silicato bicálcico, del 15 al 30%, aluminatos, del 6 al 12%, y ferritos cálcicos, del 6 al 8% [66].

Cuando el cemento portland entra en contacto con el agua, el sulfato cálcico utilizado como regulador de fraguado y los constituyentes del clinker formados a alta temperatura tienden a disolverse, saturándose la fase líquida rápidamente con varias especies iónicas. Como resultado de la combinación entre los iones de calcio, sulfato, aluminato e hidroxilo, en los primeros minutos de hidratación se observan cristales en forma de varilla, denominados etringita: trisulfoaluminato cálcico hidratado. Pocas horas más tarde, se forman grandes cristales prismáticos de hidróxido cálcico, coincidiendo con el crecimiento de cristales fibrosos muy pequeños de silicatos cálcicos hidratados que comienzan a llenar los espacios ocupados anteriormente por el agua y las partículas de cemento en disolución. Después de algunos días, dependiendo de la relación aluminato/sulfato, la etringita se hace inestable y se descompone, formando monosulfatos hidratados, de morfología hexagonal. Esta morfología hexagonal es también característica de los aluminatos cálcicos hidratados que se forman en las pastas hidratadas con alto contenido de aluminato tricálcicos C_3A .

Los tipos, cantidades y características de las cuatro principales fases sólidas presentes son [66]:

Silicatos cálcicos hidratados: Los silicatos cálcicos hidratados (abreviado C-S-H) ocupan entre el 50 y el 60% de la HCP, y son los elementos más influyentes en las propiedades de la pasta. La morfología del C-S-H varía desde fibras pobremente cristalinas hasta estructuras reticulares. Debido a sus dimensiones coloidales y a su tendencia a agruparse, los cristales de C-S-H sólo se pueden observar con microscopio electrónico. En la literatura, a esta fase se la suele denominar como gel C-S-H. La estructura interna de los cristales de C-S-H aún no está resuelta. Antiguamente, se asumía que la forma de los cristales era similar a la del mineral natural tobermorita, por esta razón al C-S-H se le denomina, también, gel tobermorítico.

Si bien la morfología de los C-S-H no se conoce, se han propuesto varios modelos. De acuerdo con el modelo Powers-Brunauer [67-69], el material presenta una estructura en capas con una alta superficie específica, del orden de 100 a 700 m²/g. La resistencia del material se atribuye, principalmente, a fuerzas de Van der Waals, y el tamaño de los poros de gel o distancia entre capas es alrededor de 18 Å. El modelo de Feldman-Sereda [70] presenta una estructura C-S-H formada por paquetes de capas o láminas dobladas irregularmente y distribuidas aleatoriamente, creándose espacios intercapas de diferentes tamaños y formas (de 5 a 25 Å).

Hidróxidos cálcicos: Los cristales de hidróxido cálcico (también llamado portlandita) constituyen el 20-25% de la HCP. El hidróxido cálcico presenta una estequiometría definida $\text{Ca}(\text{OH})_2$, tiende a formar grandes cristales con una morfología de prisma hexagonal y varía usualmente entre una estructura indefinida hasta pilas de grandes láminas, viéndose su desarrollo afectado por el espacio disponible, temperatura de hidratación y las impurezas presentes en el sistema. Comparado con el gel de C-S-H, la resistencia potencial del hidróxido cálcico generada por las fuerzas de Van der Waals es limitada, debido a su menor superficie específica. También, la presencia de una considerable cantidad de dióxido cálcico en la pasta tiene efectos adversos en los ataques químicos de soluciones ácidas, ya que los hidróxidos cálcicos son más solubles que los C-S-H [71].

Sulfoaluminatos cálcicos hidratados: Los sulfoaluminatos cálcicos hidratados ocupan entre el 15 y el 20% del volumen de la HCP y, sin embargo, juegan un papel poco importante en las propiedades de la misma. A tempranas edades de hidratación, la relación iones sulfato/aluminato en la solución favorece generalmente la formación de trisulfoaluminatos $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$, también llamados etringita, y se presentan en cristales prismáticos en forma de varillas.

En pastas elaboradas con cemento portland normal, la etringita se transforma normalmente en monosulfato, $\text{C}_4\text{ASH}_{18}$, que forma placas de cristales hexagonales. La presencia de monosulfatos en el cemento portland hace al hormigón vulnerable a los ataques de sulfatos. Cabe recordar que tanto la etringita como los monosulfatos contienen pequeñas cantidades de óxidos de hierro, los cuales pueden sustituir a la alúmina en la estructura de los cristales.

Partículas de clinker no hidratadas: Dependiendo del tamaño, distribución de las partículas del cemento anhidro y del grado de hidratación, pueden encontrarse algunas partículas de clinker no hidratadas en la estructura. En los inicios del proceso de hidratación, se disuelven las partículas más pequeñas (desaparecen del sistema) y se reducen de tamaño las más grandes. Dado el limitado espacio disponible entre las partículas, los productos de hidratación tienden a cristalizarse en las proximidades de las partículas de clinker en proceso de hidratación, apareciendo como capas que envuelven a las mismas. A edades avanzadas, debido a la ausencia de espacio, la hidratación de las partículas de clinker progresa internamente resultando productos de hidratación muy densos, que a veces se asemejan en su morfología a la partícula de clinker original.

1.3.4.1. Agua en la pasta de cemento hidratada

Dependiendo de la humedad ambiente y de la porosidad de la pasta, la HCP es capaz de contener gran cantidad de agua. La fase HCP contiene agua de distintos tipos. La clasificación del agua dentro de la misma está basada en el grado de dificultad que presenta su extracción. La división entre los distintos tipos de agua no es rígida. Basado en los estudios de Monteiro, Maso y Ollivier [72] pueden distinguirse:

Agua capilar: es el agua presente en huecos mayores de 5 mm. Se puede definir como el volumen de agua libre de la influencia de las fuerzas atractivas ejercidas por la superficie sólida. Actualmente, desde el punto de vista del comportamiento, el agua capilar en la HCP, se divide en dos categorías: agua en poros mayores de 50 nm, que puede considerarse agua libre y su extracción no causa cambio de volumen; o agua contenida en pequeños poros (5 a 50 nm), cuya eliminación puede causar retracciones en el sistema.

Agua adsorbida: es el agua que se encuentra en las cercanías de la superficie sólida, esto es, bajo la influencia de fuerzas atractivas, las moléculas de agua son físicamente adsorbidas por la superficie de los sólidos de la HCP. La fuerza de ligazón de las moléculas individuales de agua en la superficie sólida decrece con la distancia, pudiendo contrarrestarse por desecación de la HCP. Para humedades relativas por debajo del 30% se elimina la mayor parte del agua adsorbida. La pérdida del agua adsorbida es la principal responsable de la retracción por secado de la HCP.

Agua entre capas de C-S-H: esta agua está asociada con la estructura del C-S-H. Se encuentra entre las capas de C-S-H y está fuertemente ligada mediante puentes de hidrógeno. Puede eliminarse bajo una fuerte desecación. La estructura del C-S-H se contrae considerablemente con la pérdida del agua entre capas.

Agua químicamente combinada: esta agua es parte integral de la estructura de los productos cementicios hidratados. No se elimina por desecación, sino que es necesaria la calcinación de los productos hidratados para su eliminación.

1.3.5. Interfase pasta-árido

La interfase pasta-árido, aunque está compuesta por los mismos elementos que la HCP, presenta una estructura y unas propiedades diferentes a las de la matriz de pasta de cemento hidratada.

Debido a dificultades experimentales, la información sobre la zona de transición es escasa. Basándose en las descripciones dadas por Monteiro, Maso y Ollivier [72], se puede analizar la evolución de algunas características de su estructura.

En el hormigón en estado fresco se forma una película de agua alrededor de los áridos gruesos. Ésto se corresponde con una mayor relación agua/cemento en la proximidad de los áridos gruesos que fuera de ellos. En este medio, como en la HCP, los iones de calcio, sulfato, hidróxido y aluminato producidos por la disolución del sulfato cálcico y de los compuestos de aluminio y calcio, se combinan para formar etringita e hidróxido de calcio. Debido a la alta relación agua/cemento, los productos cristalinos en la vecindad de los áridos gruesos desarrollan grandes cristales y, por lo tanto, forman un entramado más poroso que en la fase HCP. Los cristales laminares de hidróxido cálcico tienden a formar capas orientadas, por ejemplo, con el eje c perpendicular a la superficie de los áridos. Con el avance del proceso de hidratación, los C-S-H pobremente cristalinos y una segunda generación de pequeños cristales de etringita e hidróxido cálcico comienzan a llenar los huecos que existen en el entramado creado por los grandes cristales de etringita e hidróxido cálcico, aumentando la densidad y, por ende, la resistencia de la zona de transición.

Como en el caso de la HCP, la causa de la adhesión entre los productos de hidratación y los áridos son las fuerzas de atracción de Van der Waals, sin embargo,

la resistencia de la zona de transición depende del volumen y tamaño de los huecos presentes. Con independencia de la relación agua/cemento en el hormigón, a edades tempranas, el volumen y tamaño de los huecos en la zona de transición es más grande que en la pasta, y en consecuencia su resistencia es menor.

Además del gran volumen de poros capilares y de la formación de cristales orientados de hidróxido cálcico, el factor responsable de la baja resistencia en la zona de transición en el hormigón es la presencia de microfisuras. La cantidad de microfisuras depende de muchos parámetros, tamaño y graduación de los áridos, contenidos de agua y cemento, grado de consolidación del hormigón fresco, condiciones de curado, humedad ambiental e historia térmica del hormigón.

La zona de transición formada será susceptible de fisuración cuando esté sometida a fuerzas de tracción inducidas por movimientos diferenciales entre el árido y la HCP. Estos movimientos diferenciales surgen con el secado y el enfriamiento del hormigón. En otras palabras, las microfisuras en la zona de transición se producen aún antes de que la estructura sea cargada. Evidentemente el impacto de cargas, la retracción por secado, o el soporte de cargas mantenidas con altos niveles de tensión, aumentará el tamaño y número de las fisuras.

Con el aumento del tiempo de hidratación, la resistencia de la zona de transición puede llegar a ser incluso mayor que la del mismo mortero. Esto puede suceder como resultado de la cristalización de nuevos productos en el espacio de la zona de transición, al producirse reacciones químicas lentas entre los constituyentes de la pasta y el árido, con la formación de silicatos cálcicos hidratados en el caso de áridos silíceos o carboaluminatos hidratados en el caso de áridos calizos.

1.3.6. Influencia de los componentes en las propiedades del hormigón

1.3.6.1. Influencia de la matriz de cemento

Las características deseables en el hormigón endurecido, resistencia, estabilidad dimensional y durabilidad, están influenciadas por la proporción de HCP presente y sus propiedades, las cuales dependen de las características de su microestructura (ej. tipo, cantidad y distribución de sólidos y poros). Polanco [73] recoge los resultados

más relevantes, en cuanto a la influencia de la pasta de cemento hidratada, de las investigaciones llevadas a cabo por Brunauer et al. [74-79], las cuales se resumen a continuación.

Resistencia: la principal fuente de unión que produce la resistencia en los productos sólidos de la HCP son las fuerzas de Van der Waals. La adhesión entre dos superficies sólidas se atribuye a esta fuerza física y, el grado de adhesión, a la extensión y naturaleza de estas superficies. Las partículas de C-S-H poseen una gran superficie específica y una enorme capacidad adhesiva. Estos productos de hidratación tienden a adherirse fuertemente no sólo unos con otros, sino también a elementos con menor superficie específica, como hidróxidos cálcicos y áridos.

Es bien conocido el hecho de que en un sólido existe una relación inversa entre resistencia y porosidad. En la HCP, los espacios existentes entre las capas de C-S-H donde actúan las fuerzas de Van der Waals, no afectan negativamente a la capacidad resistente. La concentración de tensiones ante la aplicación de la carga y su posterior rotura, comienza en los grandes poros capilares y las microfisuras invariablemente presentes. Al principio, el volumen de poros capilares en la HCP depende de la cantidad de agua mezclada con el cemento. Cuando la pasta fragua, ésta adquiere un volumen estable que es aproximadamente igual al volumen de cemento más el volumen de agua. Asumiendo que 1 cm^3 de cemento produce 2 cm^3 de producto hidratado, se puede calcular de forma simple el cambio de porosidad capilar al variar el grado de hidratación de una pasta de cemento y las relaciones agua/cemento. En la Fig. 13 se muestran dos ejemplos ilustrativos del proceso de reducción progresiva de la porosidad capilar, una con incremento del grado de hidratación:

En este ejemplo (Fig. 13) la pasta, con una relación agua/cemento en peso de 0,63 y con una densidad relativa de cemento de $3,14 \text{ g/cm}^3$, contiene 100 cm^3 de cemento, por lo que requerirá 200 cm^3 de agua. Esto suma 300 cm^3 de pasta hidratada y huecos disponibles. El grado de hidratación del cemento dependerá de las condiciones de curado (duración de la hidratación, temperatura y humedad). Asumiendo que, bajo las condiciones de curado estándar, el volumen de cemento hidratado a 7, 28, y 365 días es del 50, 75, y 100% respectivamente, el volumen de sólido (cemento anhidro más productos de hidratación) será de 150, 175 y 200 cm^3 , respectivamente. El volumen de poros capilares puede calcularse como diferencia

entre el total del espacio disponible y el volumen total de sólido, siendo respectivamente, según estos supuestos, el 50, 42 y 33% a los 7, 28, 365 días del comienzo de la hidratación.

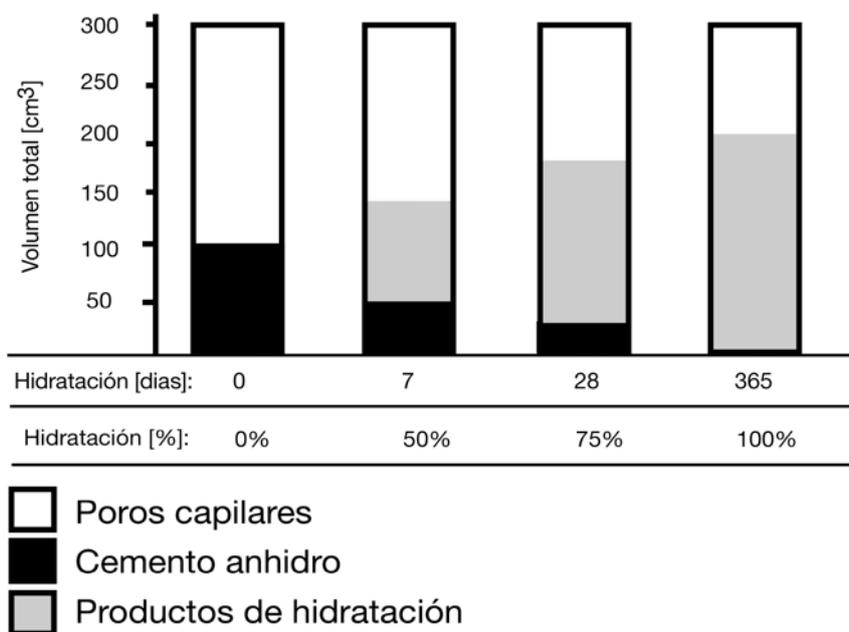


Fig. 13. Evolución de la hidratación de la pasta de cemento con $w/c=0,63$.

En la Fig. 14, se tienen 4 muestras con unas relaciones agua/cemento de 0,7, 0,6, 0,5 y 0,4, todas con el 100% de grado de hidratación. Para un volumen de cemento dado, la pasta fabricada con mayor cantidad de agua dispondrá de mayor espacio para desarrollar los productos de la hidratación. Una vez completada la hidratación, todas las pastas contendrán la misma cantidad de productos sólidos, por lo que, la pasta que partía con mayor cantidad de espacio disponible finalizará con la mayor cantidad de poros capilares. Como 100 cm^3 de cemento 100% hidratados producen 200 cm^3 de sólidos hidratados en cada caso, y el total de espacios en las muestras con 0,7, 0,6, 0,5, 0,4 de relación de agua/cemento equivale a un volumen de 320, 288, 257 y 225 cm^3 , las porosidades originales son del 37, 30, 22 y 11% respectivamente. Así, bajo la suposición hecha, con una relación agua/cemento de 0,314 no habría porosidad capilar al 100% de la hidratación.

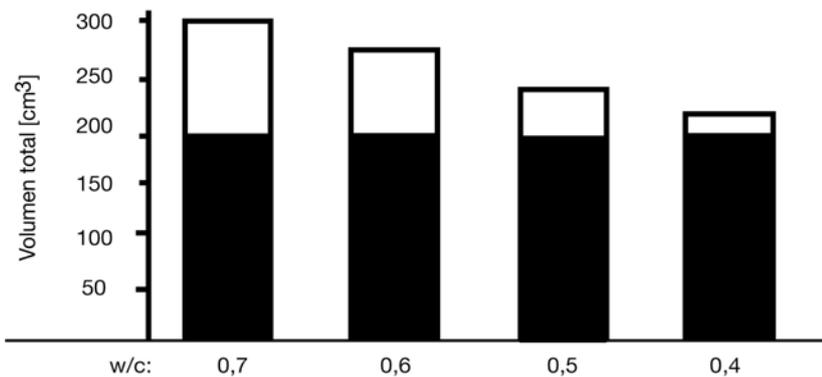


Fig. 14. Evolución de la hidratación de la pasta de cemento para distintas relaciones de agua/cemento.

Para morteros de cementos portland hidratados, Powers [68] demuestra que existe una relación potencial del tipo $S = kx^3$ entre la resistencia a compresión (S) y el cociente volumen de sólido/volumen total (x), donde k es una constante igual a 34000 psi (234 MPa).

Suponiendo distintos grados de hidratación, 25, 50, 75 y 100%, se puede calcular el efecto de incrementar la relación agua/cemento en la porosidad y, consecuentemente, en la resistencia utilizando la fórmula de Powers.

Estabilidad: La HCP saturada no es dimensionalmente estable. Cuando contenga el 100% de humedad relativa, prácticamente no experimentará cambio dimensional. Cuando se expone a la humedad ambiente, que normalmente es mucho menor que el 100%, el material comenzará a perder agua y a contraerse.

Según L'Hermite [80] tan pronto como la humedad relativa baja del 100%, el agua libre contenida en los poros mayores de 50 nm comienza a escapar al medio ambiente. Como esta agua libre no está unida a la estructura de los productos de hidratación por fuerzas físicas ni químicas, su pérdida no ocasiona retracciones.

Cuando la mayoría del agua libre se ha eliminado, si se continúa la desecación, la posterior eliminación de agua origina considerables contracciones debidas a la pérdida del agua absorbida y del agua presente en pequeños poros capilares. Cuando existen huecos estrechos confinados entre dos superficies sólidas, el agua absorbida causa presiones de desunión. La eliminación del agua absorbida reduce las presiones de desunión y afecta a la contracción del sistema. El agua presente como

una película monomolecular de agua entre las capas de C-S-H, también puede eliminarse bajo ciertas condiciones de secado. Debido al contacto más íntimo entre las capas de agua y la superficie sólida y a la tortuosidad de las vías de flujo a través de la red laminar, este secado debe ser muy enérgico. Cuando el agua en los pequeños poros capilares (5 a 50 nm) ejerce tensión hidrostática, su eliminación tiende a inducir tensión de compresión en las paredes sólidas del poro capilar, causando también una contracción al sistema.

Los mismos mecanismos responsables de la retracción por secado condicionan la fluencia de la HCP. En este caso, la tensión externa ejercida se traduce en la fuerza que origina los desplazamientos del agua físicamente absorbida y del agua contenida en los poros capilares pequeños. Así, la fluencia puede ocurrir incluso con una humedad del 100%.

Durabilidad: El término durabilidad de un material se relaciona con su vida útil bajo las condiciones ambientales a que estará sometido. La HCP es alcalina, por lo tanto, la exposición a sustancias ácidas va en detrimento de su durabilidad. La impermeabilidad llega a ser un factor primordial en la determinación de la durabilidad. Si los áridos son impermeables, la permeabilidad de la HCP implica la impermeabilidad en el hormigón. La permeabilidad viene condicionada por el tamaño y la continuidad existente entre los poros. La resistencia y la permeabilidad en la HCP se pueden relacionar, pues ambas dependen de la porosidad capilar o, lo que es lo mismo, del cociente sólido/volumen total.

El coeficiente de permeabilidad registra una caída exponencial cuando la fracción de volumen de poros se reduce de 0,4 a 0,3. Este rango, por lo tanto, corresponde al punto en el que el volumen y tamaño de poros capilares en la HCP se reduce notoriamente y sus interconexiones se hacen dificultosas. Como resultado de ello, la permeabilidad de la pasta de cemento completamente hidratada puede ser del orden de 10^6 veces menor que en la pasta joven. Powers muestra en sus experiencias que pastas con una relación agua/cemento de 0,6, completamente hidratadas, pueden ser tan impermeables como una roca densa de basalto o mármol.

Los huecos existentes al inicio del fraguado se van llenando con los productos de hidratación. De ello se deduce que la relación agua/cemento y el grado de hidratación

determinan la porosidad capilar total, la cual decrece con la disminución de la relación agua/cemento y/o el aumento del grado de hidratación.

Debe indicarse que la porosidad que presentan los huecos entre capas de C-S-H y los poros pequeños no contribuye a la permeabilidad de la pasta. Por el contrario, con el aumento del grado de hidratación se produce un incremento de los poros entre las capas de C-S-H y, sin embargo, la pasta se hace más impermeable. Existe una relación directa entre la permeabilidad y el volumen de poros mayores que 100 nm. Todo esto se ampliará en el capítulo titulado “Macroporosidad del hormigón”.

1.3.6.2. Influencia de la interfase pasta-árido

Resistencia: La zona de transición, generalmente el eslabón más débil de la cadena, se considera como determinante en la capacidad resistente de un hormigón. El hormigón falla en esa zona, pues su resistencia es mucho más baja que la de las otras dos, árido y HCP.

En el caso de hormigones tradicionales, fabricados con áridos poco porosos (calizos o silíceos) y menos deformables que la pasta de cemento hidratada, toda sollicitación mecánica conduce a un direccionamiento de las isostáticas de la pasta hacia los áridos. No obstante, debido a la alta porosidad y menor resistencia de los áridos reciclados, es presumible que los fallos tengan su origen en éstas [81].

La zona de transición no requiere de altos niveles de tensión para ampliar las microfisuras existentes, ya que las mismas se extienden incluso cuando la carga aplicada es de un 40 a un 70% de la resistencia última. Este hecho explica el fenómeno del comportamiento inelástico del hormigón frente al comportamiento elástico de cada uno de sus componentes.

Para niveles de tensión mayores al 70% de la resistencia última, la concentración de tensiones en los grandes huecos del mortero llega a ser bastante notable y se inicia su fisuración. Con el incremento de la tensión, la matriz de fisuras se extiende gradualmente hasta convertirse en continua y se origina la rotura. Se necesita gran cantidad de energía para formar y extender una matriz de fisuras bajo cargas de compresión, sin embargo, bajo tracción se propagan rápidamente, necesitándose un nivel muchísimo más bajo de tensión para producir la rotura. Este hecho explica que

el comportamiento del hormigón sea frágil a tracción y relativamente dúctil a compresión.

Para las relaciones agua/cemento normalmente utilizadas, la primera capa de productos de hidratación alrededor de la partícula de árido se sitúa a menos de 2 nm de la superficie de la misma, lo que implica uniones de tipo mecánico. Si las distancias disminuyen lo suficiente, esta unión se encuentra reforzada por efecto de las fuerzas de Van der Waals. Si los áridos se disuelven parcialmente, el proceso se modifica. Los iones liberados por los áridos pueden combinarse con los originados en la disolución del cemento anhidro y producir uniones de tipo químico con soluciones sólidas intermedias.

En cuanto a las concentraciones iónicas en la proximidad de la interfase pasta-árido, se destaca la presencia de un mínimo de concentración en la zona de transición, donde los cristales de los productos de hidratación son de mayor tamaño, la porosidad es mayor y la cohesión es débil. La disolución parcial del árido aumenta la rugosidad de las superficies, lo que favorece el anclaje mecánico de los productos de hidratación; además la superficie de contacto aumenta, lo que incrementa el efecto de las fuerzas de unión de tipo físico.

Módulo de elasticidad: la estructura de la zona de transición, especialmente el volumen de huecos y las microfisuras presentes, tiene gran influencia en el módulo de elasticidad o rigidez del hormigón. En la composición del material, la zona de transición sirve de puente entre los dos componentes altamente rígidos. La rigidez del sistema puede ser baja si falla el puente de unión, no permitiendo la transferencia de tensiones.

Durabilidad: las características de la zona de transición también influyen en la durabilidad del hormigón. Los hormigones armados y pretensados fallan, a menudo, debido a la corrosión de la armadura. La velocidad de corrosión del acero está altamente influida por la permeabilidad del hormigón. Debe destacarse que la percolación de aire y agua es un requisito necesario para que se produzca la corrosión.

La parte porosa y de más débil cohesión de la zona de transición puede constituir un camino preferencial para los agentes agresivos. La retracción y las sollicitaciones

mecánicas exteriores pueden desarrollar una microfisuración repartida en toda la masa del hormigón, ofreciendo al agua y a los agentes de alteración química que pueda transportar, una superficie de ataque considerable.

Permeabilidad: el efecto de la relación agua/cemento en la permeabilidad y resistencia del hormigón se atribuye generalmente a la relación que existe entre la relación agua/cemento y la porosidad de los productos hidratados. Dependiendo de las características de los áridos (tamaño máximo, granulometría) es posible encontrar grandes diferencias en la relación agua/cemento entre la matriz de HCP y la zona de transición. En general, cuanto mayor es el tamaño máximo del árido, más alta es la relación agua/cemento en la zona de transición y, por consiguiente, más débil y permeable será el hormigón.

1.3.6.3. Influencia del árido

Como se ha comentado anteriormente, el árido es fundamentalmente responsable de la densidad, del módulo de elasticidad y de la estabilidad dimensional del hormigón.

Resistencia: la resistencia del árido es, en general, mucho mayor que la de las otras dos fases, por lo que la influencia de esta característica en las propiedades mecánicas del hormigón no es preponderante. Sin embargo, el tamaño, forma, textura superficial, graduación y mineralogía pueden afectar en distinto grado: por un lado, introduciendo cambios en la relación agua/cemento y, por otro, condicionando las reacciones en la zona de transición. Probablemente, en el caso del hormigón reciclado puedan observarse fenómenos distintos, ya que la resistencia del árido reciclado y de la pasta de cemento nueva es similar.

Para una misma consistencia y cantidad de conglomerante, la mezcla que tenga un mayor tamaño máximo del árido requerirá una menor cantidad de agua. Contrariamente, a mayor tamaño máximo del árido, se tendrán zonas de transición más débiles conteniendo mayor número de microfisuras. En general, a mayor tamaño máximo del árido, menor es la resistencia, y su influencia es mucho mayor cuanto menor es la relación w/c. Para $w/c = 0,4$ la influencia es enorme, lo cual juega un papel importante en la resistencia.

Un cambio en la graduación del árido sin modificar ni el tamaño máximo ni la relación w/c, puede influir en la resistencia al causar modificaciones en la consistencia y trabajabilidad de la mezcla.

La resistencia a edades tempranas (especialmente a tracción) es mayor cuando los áridos son machacados y rugosos, que si son de río y lisos (para igual mineralogía). A edades tardías, cuando se manifiestan las posibles reacciones entre el árido y la pasta en la zona de transición, este efecto se ve reducido.

Módulo de elasticidad: todas las características del árido afectan al módulo de elasticidad del hormigón, sin embargo, la porosidad es la que más influye. La porosidad del árido determina su rigidez, la cual controla la transmisión de las sollicitaciones desde la HCP. En general, cuanto mayor es la cantidad de árido grueso con un elevado módulo de elasticidad, mayor es el módulo de elasticidad del hormigón fabricado con el mismo.

Permeabilidad: el volumen de poros de la mayoría de los áridos naturales ronda el 3% y raramente excede del 10%, frente al 30 ó 40% de porosidad de la HCP. Puede esperarse, por lo tanto, que la permeabilidad del árido sea muy inferior a la de la pasta de cemento hidratada.

La razón de que los áridos con menos de un 10% de porosidad presenten mayores permeabilidades que la pasta de cemento hidratada, estriba en el tamaño mayor de sus poros capilares. En la HCP totalmente hidratada, el tamaño de los poros capilares varía entre 10 y 100 nm, mientras que en los áridos, la media de los mismos puede superar los 10 μm .

1.4. EL HORMIGÓN RECICLADO

1.4.1. Introducción

El hormigón reciclado es aquel hormigón que se fabrica con residuos seleccionados y tratados con el objetivo de sustituir los áridos naturales de los que se compone el hormigón tradicional. En general, estos residuos son de naturaleza inorgánica y, en concreto, materiales pétreos con distintos orígenes, como ya ha sido analizado ampliamente. Los áridos reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición suelen ser los más adecuados para la fabricación de áridos reciclados y para la posterior sustitución de los áridos naturales en hormigones.

La utilización del hormigón reciclado supone recortar la utilización de árido de procedencia natural, reduciéndose así el volumen de árido extraído de canteras. Al mismo tiempo, se consigue un mayor control de los residuos generados, tanto en las obras, y plantas de prefabricados como en las demoliciones o deconstrucciones, ya que su uso permite gestionar de manera sostenible los desechos antes mencionados. Implica, también una mejora de la ordenación del territorio, puesto que el volumen de aquéllos que deben llevarse a vertedero se ve reducido considerablemente, sin perder de vista que se trata, éste, de un residuo de elevadas tasas de generación. Ello supondrá, además, para el proyecto un ahorro de tasas de vertido y una disminución de la demanda de transporte.

Supone, también, una respuesta a las inquietudes ambientales en el sector de la construcción, aunque todo ello precisa de concienciación ciudadana en cuanto a la reconstrucción, la correcta gestión de RCD y la confianza en el uso de materiales reciclados.

Todo ello, al menos inicialmente, deberá estar gestionado adecuadamente por las administraciones, lo que requiere, también, impulsar el uso del hormigón reciclado mediante ayudas económicas ya consideradas en los Planes Nacionales de Residuos de Construcción y Demolición (I PNRCD y II PNRCD) [1,6].

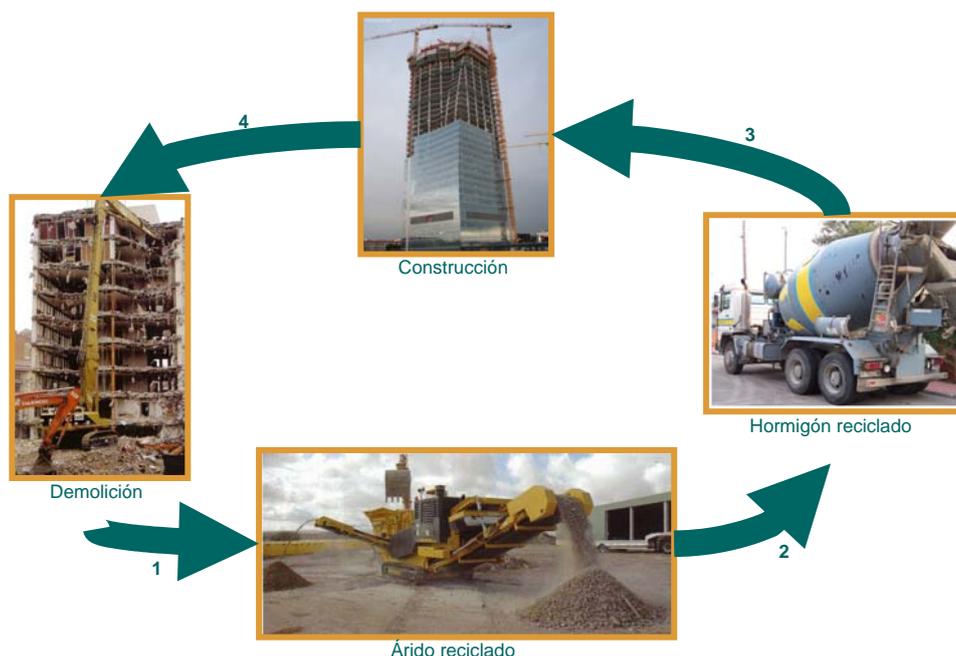


Fig. 15. Idealización del ciclo de vida del hormigón, una vez finalizado su uso inicial, dividido en 4 etapas: demolición, producción de árido reciclado, fabricación de hormigón reciclado y construcción.

1.4.2. Instrucción Española del Hormigón Estructural

La EHE-08 establece en su Anejo 15 [9] las recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados, extendiendo las recomendaciones establecidas para hormigones estructurales a hormigones reciclados estructurales.

En la Instrucción queda definido el concepto de hormigón reciclado como aquel hormigón fabricado con árido grueso reciclado procedente del machaqueo de residuos de hormigón. Estableciendo, a efectos legales, como hormigón reciclado solo aquel que incorpora árido grueso reciclado y solo procedente del procesado de residuos de hormigón. Por lo tanto, quedan excluidas de la definición de árido reciclado, las arenas y otro tipo de residuos de construcción y demolición.

La Instrucción recomienda, en todo caso, la utilización de un máximo de un 20% en peso de árido grueso. En este sentido, como se comprobará a lo largo de la Tesis, la incorporación de porcentajes por debajo de este valor no afecta sustancialmente a las características del hormigón reciclado de aplicación estructural. No obstante, como se verá, según el tipo de aplicación, porcentajes mayores pueden ser también admisibles aunque no recogidos por la Instrucción hasta la fecha. Así, si se eligiesen

sustituciones mayores del 20% se recomienda siempre realizar ensayos específicos complementarios a fin de valorar su competencia.

El objetivo del Anejo es dar indicaciones sobre algunas de las propiedades del hormigón que pueden verse afectadas con sustituciones superiores al límite indicado, complementando las prescripciones incluidas en los distintos artículos de la Instrucción, o que incluso en algunos casos las sustituyen, manteniéndose vigentes el resto de prescripciones que no entren en contradicción con las recogidas en el Anejo.

El árido reciclado puede emplearse tanto para hormigón en masa como hormigón armado de resistencia característica no superior a 40 MPa, quedando excluido su empleo en hormigón pretensado. En este sentido, la presente Tesis demuestra que la utilización de árido reciclado afecta porcentualmente en mayor medida a los hormigones más resistentes, en general de mejores características, aunque son precisamente los hormigones más resistentes los que mejor admiten la incorporación de los áridos reciclados puesto que las pérdidas absolutas son menores.

La EHE-08 no contempla los siguientes supuestos:

- Los hormigones fabricados con árido fino reciclado debido, presumiblemente, a la gran demanda de agua que su utilización supondría.
- Los hormigones fabricados con áridos reciclados de naturaleza distinta del hormigón: áridos mayoritariamente cerámicos, asfálticos, etc.
- Los hormigones fabricados con áridos reciclados procedentes de estructuras de hormigón con patologías que afectan a la calidad del hormigón tales como álcali-árido, ataque por sulfatos, fuego, etc.
- Hormigones fabricados con áridos reciclados procedentes de hormigones especiales tales como aluminoso, con fibras, con polímeros, etc.

En el caso de hormigones reciclados con un porcentaje de árido reciclado menor o igual al 20%, los valores característicos del peso propio se obtienen a partir de los mismos valores de densidades que establece la Instrucción:

- Hormigón en masa 2,3 g/cm³

- Hormigón armado 2,5 g/cm³

Según la Instrucción, para porcentajes de árido grueso reciclado superiores al 20%, la densidad resultante del hormigón reciclado es inferior a la de un hormigón convencional por la menor densidad que presenta el árido reciclado, a causa del mortero que permanece adherido al árido natural [4]. Cuanto mayor es el porcentaje de árido reciclado utilizado menor será la densidad del hormigón. Así, para sustituciones totales del árido grueso, los descensos se sitúan entre el 5-15% de la densidad de un hormigón convencional.

Los tipos de cemento utilizados en la fabricación de hormigones con áridos reciclados serán los mismos que se emplean en un hormigón convencional para las mismas aplicaciones.

1.4.3. Dosificación y fabricación de hormigón reciclado

En general, la dosificación y fabricación del hormigón reciclado se realizará de la misma forma que el hormigón tradicional, a excepción de incorporaciones mayores del 20% en las que habrá que disponer de consideraciones en cuanto a las características especiales de los áridos reciclados. Así, la EHE-08 recomienda en hormigones reciclados, con sustitución mayor al 20%, dada la fuerte reducción de la cantidad de agua de amasado que provoca la alta absorción de los áridos reciclados, la utilización de aditivos que modifiquen la reología para la mejora de la trabajabilidad, compensando la mayor absorción de agua del árido reciclado si éste se utiliza en estado seco. No obstante, recientes investigaciones [41,51,57,82,83] recomiendan la utilización del árido reciclado en condiciones de saturación con el objetivo de minimizar este efecto negativo.

En la misma línea, en hormigón reciclado con más de un 20% de árido reciclado, los valores de referencia en cuanto a la relación agua/cemento recogidos en la Instrucción pueden ser insuficientes, siendo recomendable ajustar la dosificación de forma que se cumplan los requisitos referentes al resultado del ensayo de penetración de agua, según se recoge en el articulado de la Instrucción, para todas las clases de exposición excepto la I y IIb.

1.4.4. Propiedades físicas y durabilidad del hormigón reciclado

A continuación, se hará un breve repaso de las principales características conocidas del hormigón reciclado en relación a los objetivos de la presente Tesis.

La Instrucción establece unos recubrimientos mínimos de hormigón en función de la resistencia del mismo y de la clase de exposición, que serán de aplicación para los hormigones con un contenido de árido reciclado no superior al 20%. Para hormigones con mayor contenido de árido reciclado se podrán también mantener los recubrimientos de la Instrucción si las dosificaciones adoptadas de hormigón garantizan, para ambientes agresivos y mediante los estudios pertinentes, una durabilidad similar a la que la Instrucción demanda al hormigón convencional en cada ambiente.

La mayor porosidad del árido reciclado hace al hormigón reciclado que lo incorpora más susceptible de sufrir los efectos del ambiente, por lo que se deberán tomar medidas especiales cuando se utilice en ambientes agresivos y en porcentajes de árido reciclado superiores al 20%. Este comportamiento deberá tenerse en cuenta, en la dosificación de la mezcla, mediante un incremento en el contenido de cemento o una disminución de la relación agua/cemento. Otra posibilidad es aumentar el recubrimiento de las armaduras necesario en determinados ambientes agresivos.

La durabilidad del hormigón convencional se explica en gran parte por la dificultad que los agentes agresivos tienen para penetrar la red de poros del hormigón, por ello, la porosidad y la permeabilidad son propiedades fundamentales que condicionan la durabilidad. La utilización de áridos reciclados introduce un mayor volumen de poros en el hormigón que afectará a todos los mecanismos de transporte, facilitando la penetración de los agentes agresivos, lo que puede traducirse en una disminución de la durabilidad.

Otra cuestión específica de los hormigones con áridos reciclados es la presencia de una pasta de distinta naturaleza a la del nuevo hormigón y que puede influir en la carbonatación y en la reacción álcali-árido. Así, el hormigón original puede no haber experimentado la reacción álcali-árido a pesar de contener árido reactivo, por falta de

alcalinos y/o de agua, condiciones que sin embargo pueden darse en el nuevo hormigón por el cemento empleado y por la permeabilidad del mismo.

La presencia de agua es el principal factor en el deterioro del hormigón, con excepción del deterioro mecánico. El transporte de agua a través del hormigón viene determinado por el tipo, tamaño, distribución e interconexión de los poros y fisuras. Estos factores determinan la permeabilidad del hormigón y a su vez, ésta condiciona decisivamente la durabilidad. Una vez producida la entrada del agua desde la superficie, ésta circula por el hormigón en función de su porosidad, transportando a su vez las sustancias agresivas disueltas.

La incorporación del árido reciclado en el hormigón representa un aumento de su porosidad, de su capacidad de absorción y de su permeabilidad, aunque el resultado final depende también de las características de la nueva matriz cementante. Diferentes estudios [45,84], que han evaluado esta propiedad en hormigones con sustitución del árido grueso natural por árido grueso reciclado han obtenido un aumento del coeficiente de absorción de los hormigones reciclados comparados con los hormigones convencionales. Estos incrementos dependen de la porosidad del árido reciclado y del porcentaje de sustitución, y pueden variar entre el 15% y 70% respecto a la absorción del hormigón convencional.

Otros estudios han comprobado que porosidad y permeabilidad aumentan con la inclusión de árido reciclado, siendo este efecto mucho más importante cuando se utilizan además las fracciones recicladas finas [85]. El aumento de la porosidad en estos casos es de 1,5 a 2 veces mayor que la del hormigón de control.

En general no existe acuerdo entre los autores sobre cuál es el comportamiento de los hormigones con áridos reciclados frente a la carbonatación y el consiguiente riesgo de corrosión. En este sentido, algunos estudios encuentran que el proceso de carbonatación y el desarrollo del frente de carbonatación dependen de los valores relativos de permeabilidad del mortero nuevo y del árido reciclado, lo que explicaría las discrepancias entre los valores encontrados por distintos autores. Hansen [86] cita estudios de carbonatación llevados a cabo en Japón, en diferentes condiciones experimentales, que mostraron un aumento del 65% en la tasa de carbonatación en relación con el de control. Por el contrario, esta tendencia contrasta con el aumento

nominal del 10% encontrado por estudios llevados a cabo por Sagoe-Crentsil [87] en el que las tasas de carbonatación muestran poca diferencia entre el hormigón reciclado comercial y el hormigón de referencia con un contenido de cemento de 242 kg/m³.

A este respecto, parece ser que cuando el árido reciclado es más permeable que el mortero nuevo, aquel actúa como foco de propagación de la carbonatación y por lo tanto la profundidad de carbonatación es mayor que la observada en el hormigón convencional de la misma resistencia. Además de esto, el frente de carbonatación es irregular, con picos que coinciden con los áridos porosos. No obstante, en el caso de que la permeabilidad del árido sea igual o inferior a la del mortero nuevo, la carbonatación será similar a la del hormigón convencional ya que la penetración del dióxido de carbono se producirá preferentemente a través del mortero nuevo. También hay que tener en cuenta que la reserva alcalina del hormigón con árido reciclado puede ser mayor al aumentar la cantidad de pasta presente, lo que provocaría una disminución de la velocidad de avance del frente de carbonatación. Así, autores como Levy [88] han encontrado que la profundidad de carbonatación disminuye cuando aumenta la cantidad de áridos reciclados especialmente cuando se practican altas sustituciones de áridos reciclados, gruesos y finos. Por lo tanto, los resultados parecen indicar que la utilización de áridos gruesos reciclados de calidad y en pequeña cantidad, mantienen profundidades de carbonatación similares a las de los hormigones convencionales.

La penetración del ión cloruro en el hormigón reciclado tiene lugar a través del mortero nuevo, la zona de transición entre pasta nueva y árido reciclado y a través del mortero viejo. Es evidente, tal y como recoge la Instrucción, que si se disminuye la permeabilidad de cualquiera de los tres medios, disminuirá la facilidad de penetración de los cloruros. Aunque no se han localizado estudios que evalúen el comportamiento frente a la penetración de cloruros de hormigones con reducidos porcentajes de árido grueso reciclado (20%), es previsible que sea prácticamente similar al de los hormigones convencionales, al igual que sucede con otras propiedades como la absorción o la permeabilidad del hormigón reciclado. Será éste uno de los objetivos a clarificar en la presente Tesis.

1.4.5. Propiedades mecánicas del hormigón reciclado

Como se comprobará a lo largo de la Tesis, el método de fabricación del hormigón reciclado influye decisivamente sobre las propiedades mecánicas del mismo. La mayor dificultad en cuanto a la evaluación de la pérdida de resistencia debida a la presencia de árido reciclado tiene su origen en la estimación de la relación agua/cemento efectiva. Así, como ya se ha comentado, la incorporación del árido reciclado seco puede reducir la relación agua/cemento considerablemente. Por ello, algunos estudios han encontrado que la utilización de áridos reciclados mejora las prestaciones del hormigón fabricado con ellos [51,89,90] aunque a costa de reducir la relación agua/cemento. En contra, la saturación de los áridos puede provocar un aporte excesivo de agua disponible, aumentando, por ello, la relación agua/cemento y registrándose caídas en las prestaciones mecánicas mayores de las que son debidas propiamente al árido reciclado. En este sentido, cabe destacar que, tras la determinación de la relación agua/cemento efectiva, se ha encontrado que existe una pérdida en las propiedades mecánicas debida a la incorporación de áridos reciclados.

1.4.5.1. Deformabilidad

El diagrama del articulado de la Instrucción EHE-08 es válido para los hormigones reciclados con un porcentaje de sustitución del árido grueso no superior al 20%. Para porcentajes de árido reciclado superiores al 20%, hay dos aspectos del diagrama tensión-deformación que pueden verse afectados. Por una parte, se produce un aumento de la deformación a medida que aumenta el porcentaje de árido reciclado, debido a la mayor deformabilidad de estos áridos. Por otra parte, se pueden acusar mayores pérdidas de resistencia, en comparación con el hormigón convencional, en ensayos bajo cargas sostenidas. Por tanto, en estos casos se recomienda la realización de estudios específicos para fijar el diagrama de cálculo que se debe utilizar.

Nuevamente, la fórmula y las tablas de los comentarios del articulado para calcular el módulo de deformación longitudinal del hormigón, son válidas para hormigones con un porcentaje de árido grueso reciclado no superior al 20%. Para sustituciones de árido reciclado por encima del 20%, el módulo de deformación longitudinal disminuye progresivamente al aumentar el porcentaje de árido reciclado.

Como valor orientativo, la Instrucción recoge que para una sustitución del 100% de árido grueso reciclado, el módulo del hormigón reciclado será 0,8 veces el del hormigón convencional. Sin embargo, y debido a la variación de la calidad de los áridos reciclados, se puede producir una gran dispersión en este valor (pudiéndose presentar valores incluso inferiores al apuntado), por lo que aconseja realizar ensayos en cada caso.

1.4.5.2. Fluencia y retracción del hormigón

La fórmula y las tablas de la Instrucción, así como sus comentarios, para estimar la retracción del hormigón son válidos para sustituciones de árido grueso reciclado no superiores al 20%. Para sustituciones de árido reciclado por encima del 20%, la retracción aumenta progresivamente al aumentar el porcentaje de árido reciclado.

Como valor orientativo, y para un 100% de árido grueso reciclado, la retracción será 1,5 veces la de un hormigón convencional. Debido a la fluctuación de la calidad de los áridos reciclados, se puede producir una gran dispersión en el valor de la retracción, pudiéndose presentar valores superiores al indicado, por lo que se aconseja realizar ensayos específicos en cada caso.

Para sustituciones de árido reciclado por encima del 20%, la fluencia aumenta progresivamente al aumentar el porcentaje de árido reciclado. En el cálculo de la misma, este efecto se refleja a través de la disminución que experimenta el módulo de deformación longitudinal, según lo indicado en el artículo 39.6 del Anejo correspondiente. Así, como valor orientativo para un 100% de árido grueso reciclado, la fluencia será 1,25 veces la de un hormigón convencional. Debido a la fluctuación de la calidad de los áridos reciclados, se puede producir una gran dispersión en el valor de la fluencia, pudiéndose presentar valores superiores al indicado, por lo que se aconseja realizar ensayos en cada caso.

1.4.6. Comportamiento a fatiga del hormigón reciclado

Hasta la fecha no se han localizado investigaciones que hayan caracterizado el hormigón reciclado en cuanto a su comportamiento a fatiga. Por ello, el capítulo correspondiente de la presente Tesis será uno de los más extensos. Sí se han realizado comunicaciones en congresos de algunos de los resultados obtenidos en la

parte experimental de la presente Tesis. Algunas de estas conclusiones, recogidas en la publicación “Determinación del límite a fatiga en hormigones reciclados de aplicación estructural” del año 2009 [91] son que, en los ensayos de fatiga Locati, se detecta un aumento de la deformación máxima en cada uno de los niveles, aumentando la pendiente de la recta de cada uno de los escalones hasta el momento del colapso. Además, se puede relacionar la pendiente de la deformación máxima con el número de ciclos para los cuales el hormigón es competente. Cuando el hormigón reciclado se dosifica con la misma relación agua/cemento que el de control, el primero presenta mejores prestaciones mecánicas frente a los ensayos de compresión simple, debido a las mejores características de la pasta de cemento. Sin embargo, esta particularidad no se ve reflejada en los ensayos mecánicos de fatiga a compresión debido a la naturaleza de los áridos reciclados y al tamaño de los poros de la pasta de cemento nueva. Por otra parte, la deformación máxima sufrida por los hormigones reciclados es mayor que la de los hormigones de referencia y finalmente el valor obtenido del límite a fatiga por el método Staircase puede identificarse en las curvas de pendiente de la deformación máxima frente a carga obtenidas mediante el método Locati, validando de esta forma esta metodología.

En la publicación “Daño por fatiga en hormigones reciclados” del año 2011 [92], se indica que la rigidez presenta 3 etapas. En la primera de ellas, generación de fisuras, se encuentra una fuerte caída, este tramo es mayor (número de ciclos) en el caso de los hormigones de control y más pronunciado en el caso de los hormigones reciclados. El segundo tramo, de crecimiento de fisuras, de menor pendiente que el anterior, presenta una mayor pendiente cuando el grado de sustitución es alto. Finalmente, el tramo de propagación e interconexión de fisuras es tanto más pronunciado cuanto mayor es el porcentaje de árido reciclado. Además, el límite a fatiga de los hormigones de control se sitúa en torno al 50% de la resistencia a compresión. Éste valor disminuye a medida que aumenta el grado de sustitución hasta un valor de un 30% en el caso del hormigón 100% reciclado. La influencia del árido reciclado en el límite a fatiga del hormigón reciclado es tanto mayor cuanto menos resistente sea la pasta de cemento, es decir, cuanto mayor es la relación agua/cemento.

1.4.7. Investigaciones llevadas a cabo en España

A continuación, se realizará un breve resumen de las investigaciones más relevantes llevadas a cabo en España en relación a los áridos reciclados y los hormigones fabricados con ellos.

1.4.7.1. Estudio de la durabilidad del hormigón con árido reciclado en su aplicación como hormigón armado (1996)

Tesis presentada por Marilda Barra en 1996 [93], en la que se estudia la utilización de áridos reciclados procedentes de hormigón en estructuras de hormigón armado haciendo especial hincapié en la durabilidad de los mismos. Se trata de uno de los primeros trabajos que reflejan las limitaciones que supone el alto grado de absorción de los áridos reciclados. Además, se afirma que el consumo de cemento que mantiene la resistencia a compresión de los hormigones reciclados, respecto a un hormigón dosificado con áridos convencionales, debe aumentar. Dicho aumento oscila entre un 7,2% para resistencias a compresión más bajas y un 17,3% para las más altas. También, la mayor porosidad del árido reciclado influye negativamente en la carbonatación del hormigón. Por otro lado, se concluye que el módulo elástico en los hormigones reciclados estudiados es un 20% inferior a los de control.

1.4.7.2. Caracterización de residuos de construcción y demoliciones de la Comunidad de Madrid como áridos reciclados para la fabricación de hormigones (2001)

La Tesis en cuestión fue defendida en el año 2001 por José Luis Parra Alfaro [94]. En ella se profundiza en la caracterización composicional, física y química de los áridos reciclados sondeados en la Comunidad de Madrid. Se recomienda, para la obtención de buenos resultados en los hormigones reciclados, no superar sustituciones de árido grueso del 50%. Nuevamente se analizan las dificultades debidas a la elevada absorción de los áridos y, por ello, se sugiere la saturación previa a la preparación del hormigón para garantizar su trabajabilidad. En cuanto a las propiedades mecánicas, la resistencia a compresión en los hormigones reciclados ensayados es equiparable a la de los convencionales con sustituciones de hasta el 60% del árido grueso con un 20% de residuos procedentes de ladrillo. En lo referente a la durabilidad, la penetración de agua es similar a la de los hormigones convencionales.

1.4.7.3. Comportamiento tenso-deformación instantáneo y diferido de hormigón con árido reciclado (2001)

En esta Tesis, escrita por José Manuel Gómez Soberón en el año 2001 [95], se comprueba que alguna propiedad de los áridos reciclados procedentes de hormigón no cumple determinadas prescripciones correspondientes a los áridos naturales, aunque pueden emplearse en la fabricación de hormigón. Nuevamente, se remarca que las propiedades de los áridos reciclados que más control requieren por su mayor diferencia respecto de las de los áridos naturales son la densidad, la absorción y la porosidad. Desde el punto de vista mecánico, las tensiones y deformaciones del hormigón reciclado han de ser analizadas como un sistema compuesto por cuatro componentes: mortero nuevo, mortero de material reciclado, mortero enlazado con áridos y áridos naturales, ya que las propiedades físicas y mecánicas del hormigón reciclado dependerán de las de dichos componentes, de su mecanismo de interacción y de su porcentaje de presencia respecto al total.

1.4.7.4. Hormigones con áridos reciclados procedentes de demoliciones: dosificaciones, propiedades mecánicas y comportamiento estructural a cortante (2002)

En el año 2002, Belén González Fonteboa publica su Tesis Doctoral "*Hormigones con áridos reciclados procedentes de demoliciones: dosificaciones, propiedades mecánicas y comportamiento estructural a cortante*" [96]. En la misma vuelve a identificarse la absorción de los áridos reciclados como característica más significativa en cuanto a su utilización, presentando valores superiores a los convencionales. La densidad de los mismos es inferior en un 10%. Sustituciones del árido grueso natural por árido grueso reciclado proporcionan hormigones reciclados estructurales adecuados. Para conseguir la trabajabilidad adecuada en los hormigones reciclados estudiados se aumenta la cantidad de agua, por lo que para mantener la misma relación agua/cemento se aumenta el consumo de cemento. El módulo de elasticidad disminuye al incorporar áridos reciclados. La absorción en los hormigones con áridos reciclados es superior a la del hormigón convencional.

1.4.7.5. Diseño de nuevos materiales procedentes del reciclaje de escombros de construcción y demolición. RUE (residuos urbanos de edificación) y RAHA (residuos de aglomerados hidráulicos y asfálticos) (2003)

Tesis Doctoral desarrollada en la Universidad de Cantabria por Gilbert Francisco en el año 2003 [97]. En ella, se analiza la problemática detectada en anteriores trabajos en cuanto a los altos niveles de la absorción que presentan los áridos reciclados empleados. Debido a ello, se recomienda una saturación previa sumergiéndolos entre 10 y 15 minutos en agua para garantizar la trabajabilidad de hormigones no estructurales. Dosificaciones del 65% de árido grueso reciclado, procedente de residuos urbanos de edificación, y del 35% de árido fino natural, permiten la elaboración de hormigón magro vibrado y pobre. Se analiza, también, la utilización de estos residuos en otro tipo de aplicaciones; así, el empleo de residuos de aglomerados hidráulicos y asfálticos en rellenos, subbases y bases de firmes proporciona resultados excelentes. Las proporciones de residuos de aglomerados hidráulicos y asfálticos que se sugieren son del 20-60% de residuos de mezclas asfálticas y del 80-40% de residuos de pavimentos de hormigón.

1.4.7.6. Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural (2004)

La investigación más completa en cuanto a la caracterización de residuos de construcción y demolición y los áridos fabricados con ellos, haciendo especial mención a las cualidades de los mismos para la fabricación de hormigones estructurales, se debe a Marta Sánchez de Juan y fue defendida en el año 2004 [98]. En ella, se afirma que la calidad del árido reciclado depende de la cantidad de mortero adherido y, en menor medida, de la resistencia del hormigón original. Además, se introduce una limitación que mejorará en gran medida las características de los hormigones reciclados: la utilización de árido reciclado debe restringirse a la fracción gruesa. Por otra parte, la dosificación del hormigón se realiza de manera similar a la de un hormigón convencional, y un porcentaje máximo del 20% de sustitución de la grava por árido reciclado grueso no provoca caídas en los valores de la resistencia a compresión del hormigón. Se establece el 7% como límite de la absorción para los áridos reciclados con el fin de cumplir las prescripciones correspondientes de la Instrucción Española del Hormigón Estructural.

1.4.7.7. Estudio sobre los residuos de construcción y demolición en Galicia: método de estimación de la producción anual y usos posibles para su reciclaje (2006)

Isabel Martínez Lage presentó en el año 2006 [99] una Tesis Doctoral en la que se propone un método general para estimar la generación y composición de residuos de construcción y demolición aplicable a cualquier ámbito territorial. Se estudió la viabilidad del uso de áridos reciclados mixtos en la fabricación de suelo cemento. Debido a la mayor absorción de los áridos reciclados la humedad óptima del suelo cemento fabricado con áridos reciclados, es mucho mayor que la del fabricado con áridos convencionales.

Al añadir la fracción 5/20 mm saturada con superficie seca, la resistencia a compresión de las probetas de suelo cemento aumenta con respecto a la que tienen si no se satura dicha fracción. La trabajabilidad del suelo cemento aumenta cuando se fabrica con la fracción 5/20 mm saturada. La resistencia a compresión del suelo cemento disminuye al aumentar el plazo entre el amasado y el compactado independientemente de saturar o no la fracción 5/20 mm.

1.4.7.8. Guía Española de Áridos Reciclados procedentes de Residuos de Construcción y Demolición (2006-2010)

La “Guía Española de Áridos Reciclados procedentes de RCD”, (Proyecto GEAR) [100] es una iniciativa de la Asociación Española de Gestores de RCD, (GERD) [3], con el objetivo de caracterizar técnicamente y estandarizar los áridos reciclados obtenidos a partir del reciclaje de los residuos de construcción y demolición.

El proyecto de desarrollo tecnológico basado en la experiencia acumulada por la industria del reciclaje española y en el rigor del análisis y la investigación científica de los Centros Tecnológicos y Universidades participantes busca definir, las mejores aplicaciones y usos en la obra pública y privada, garantizando la durabilidad y su adecuado comportamiento mecánico y medioambiental.

Esta guía comprende un conjunto de propuestas de prescripciones técnicas referidas a las principales aplicaciones de los áridos reciclados. Su función es la de presentar los requisitos detallados que deben cumplir los áridos reciclados que van a ser utilizados en estas aplicaciones. El objetivo es garantizar la calidad y seguridad

medioambiental de su uso, al establecer prescripciones particulares para los usos recomendados.

1.4.7.9. Influencia de la variación de los parámetros de dosificación y fabricación de hormigón reciclado estructural sobre sus propiedades físicas y mecánicas (2008)

Tesis publicada en el año 2008 por Fernando López Gayarre [101], en la que se realiza un profundo estudio de los resultados experimentales obtenidos sobre las principales propiedades del hormigón reciclado llevada a cabo mediante análisis de varianza, determinando las diferencias más significativas existentes, debidas a la fluctuación en los niveles fijados para los factores considerados, respecto al hormigón convencional. Finalmente, se extraen conclusiones relativas al empleo de hormigón fabricado con áridos reciclados con fines estructurales y se sugieren futuras líneas de trabajo que nos ayuden a comprender mejor este campo.

1.4.7.10. Comportamiento de hormigones con árido cerámico reciclado: estudio físico-mecánico, microestructural y de durabilidad (2011)

Tesis defendida en el año 2011 por César Medina Martínez [102] y en la que se analizan áridos reciclados cerámicos procedentes de residuos sanitarios. Se afirma que el árido cerámico cumple con todos los requisitos físicos, químicos y mecánicos exigidos en el artículo 28º de la EHE-08 para los áridos que son empleados en la fabricación de hormigones. Además, los hormigones con árido cerámico cumplen los requisitos de durabilidad (contenido mínimo de cemento y relación a/c máxima) y de resistencia característica establecidos en los puntos 37.3 y 39.2 de la EHE-08 respectivamente. Por todo ello, los hormigones con árido cerámico pueden ser utilizados con fines estructurales. Por su parte, la durabilidad de los hormigones frente a los ataques químicos, físicos y biológicos a lo largo de su vida útil, no se ve afectada de manera significativa por la incorporación de árido cerámico. Este buen comportamiento hace que sea posible su utilización en ambientes agresivos.

1.4.7.11. Estudio experimental preformativo sobre la utilización de los residuos de construcción y demoliciones en hormigón reciclado de aplicación estructural (2005-2011)

En el campo de la normalización de los áridos reciclados utilizados para fabricar hormigón se han hecho grandes avances en España en los últimos años. Así, y con el propósito de elaborar unas recomendaciones normativas en este campo, en noviembre de 2002 se constituyó el Grupo de Trabajo 2/5 “Hormigón Reciclado” [3,4] a instancias de la Comisión Permanente del Hormigón, que contó con la participación de dieciséis expertos en el tema pertenecientes a diferentes centros de investigación (ETSI de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, La Coruña, Santander, la ETSI de Minas de Madrid, la EITOP de Madrid, todos ellos coordinados por el CEDEX) y del campo empresarial (IECA e Isolux-Corsán Corvián). Los objetivos del Grupo de Trabajo fueron: redactar un Estado del Arte sobre hormigón reciclado y elaborar un documento para complementar la reglamentación actual de hormigón estructural con recomendaciones específicas sobre la utilización del árido reciclado.

Los documentos resultantes fueron publicados en la Monografía M-11 (2006) de la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE) [4]. Asimismo, la última actualización de la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 [9,82] incluye el Anejo 15 “Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados”, fruto de dichos trabajos.

En la elaboración de la citada normativa, fueron detectados aspectos de los hormigones reciclados con un menor grado de conocimiento, y que por tanto no pudieron ser recogidos de forma completa por dicha normativa. Por ese motivo, se vio la necesidad de continuar con la labor investigadora de forma coordinada para cubrir estos aspectos. Así surgió el proyecto de investigación experimental “Estudio Prenormativo sobre la Utilización de los RCDs en Hormigón Reciclado de Aplicación Estructural (RECNHOR)”, financiado por el Ministerio de Medio Ambiente a través del Programa Nacional de Ciencias y Tecnologías Medioambientales del Plan Nacional de I+D+i 2004-2007. En el desarrollo de esta experimentación, a los seis organismos de investigación antes citados se une la ETSI de Caminos de Valencia.

A la finalización del Proyecto, se decidió ampliar las muestras de ensayo para obtener un mayor número de resultados, por lo que el 21 de mayo de 2007, se firma un

Convenio de colaboración entre el CLEAM-CENIT, AIE¹ para la realización de trabajos de I+D en el marco del proyecto CENIT “CLEAM” resolviéndose favorablemente la solicitud de subvención por el CDTI² (Ministerio de Ciencia e Innovación). En dicho proyecto se incluyó la “Tarea 2.1: Reciclado de RCDs como áridos de hormigones estructurales”, liderada por la Empresa Sacyr-Vallehermoso y que ha sido llevada a cabo por los centros de investigación antes citados, permitiendo así dar continuidad a los trabajos iniciales desarrollados en el proyecto RECNHOR.

Los resultados de esta investigación experimental desarrollada durante un total de seis años para ambos proyectos se recogen en una publicación [103] del IECA³ (cuyos autores son Pilar Alaejos, por parte del CEDEX como Coordinadora; Marta Sánchez de Juan, por parte del CEDEX, como Secretaria; Fernando Martínez Abella y Belén González Fonteboa por parte de la UDC; Enric Vázquez y Marilda Barra por parte de la UPC; Juan Antonio Polanco y Carlos Thomas García por parte de la UC, José Luis Parra y Alfaro por parte de la UPM-ETSI de Minas, Enrique Dapena por parte de la UPM-EUITOP, M^a José Pelufo y Vivian Andrea Ulloa por parte de la UPV y M^a Dolores Carvajal por parte de SACYR) esperando que sean de utilidad en una futura revisión de la Instrucción EHE-08 para complementar los aspectos normativos de aplicación. Las principales conclusiones pueden resumirse en:

- En cuanto al comportamiento mecánico de los áridos reciclados se observa una notable pérdida de rigidez a medida que se aumenta la incorporación de árido reciclado. Por su parte, los comportamientos que presentan los áridos reciclados, mezclados con árido natural o no, son muy similares. En cuanto a la respuesta del árido natural, ostenta una mayor rigidez frente a las cargas de compresión. Producida la rotura por compresión de alguna de las partículas, se advierte una rigidización de las deformaciones originadas, no existiendo diferencias apreciables entre dosificaciones, independientemente de la fracción estudiada y de la incorporación mayor o menor de material reciclado.

- En cuanto a las propiedades mecánicas del hormigón reciclado, los resultados resaltan la importancia que tiene el proceso de presaturación de los áridos, que

¹ Agrupaciones de Interés Económico

² Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial

³ Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones

puede originar la incorporación de un mayor contenido de agua a la dosificación y también añade una variable de dispersión mayor a los resultados de resistencia. La presaturación, por tanto, sólo resultaría recomendable en aquellos casos en los que resulta indispensable, por ejemplo con altos niveles de sustitución (50% de árido reciclado o superior). En estos casos, sería preciso que las Centrales incorporaran sistemas de presaturación moderada (regado o aspersión) del árido que garantizaran que no se introduce agua adicional a la amasada.

- A partir del estudio sobre la penetración de agua bajo presión del hormigón reciclado para evaluar su durabilidad, se concluye que los hormigones reciclados con más de un 20% de árido reciclado, especialmente cuando éstos se utilizan saturados, pueden presentar una mayor penetración de agua que los hormigones convencionales con la misma dosificación, por lo que sería necesario aumentar en este tipo de hormigones los recubrimientos mínimos establecidos en la EHE para ambientes agresivos, o bien disminuir la relación agua/cemento mínima exigida en 0,1 puntos.
- A partir del estudio sobre carbonatación del hormigón reciclado para evaluar su durabilidad, se concluye que los hormigones reciclados con más de un 20% de árido reciclado, especialmente cuando éstos se utilizan saturados, presentan un comportamiento ligeramente más desfavorable al de los hormigones convencionales de igual dosificación. Por tanto, sería necesario en este tipo de hormigones utilizar dosificaciones ligeramente más estrictas para los ambientes IIa y IIb de la Instrucción. En concreto, sería conveniente reducir en 0,05 puntos las relaciones agua/cemento exigidas por la Instrucción EHE en estos ambientes.
- De los resultados de porosidad accesible del hormigón reciclado, puede concluirse que en todos los casos la incorporación de árido reciclado saturado implica un aumento de la porosidad accesible del hormigón. Según los valores de resistencia-porosidad, para una incorporación de un 20% y una relación agua/cemento del hormigón de control de 0,65, sería necesario disminuir esta relación en, aproximadamente, 0,05 puntos. Por su parte, si se incorpora un 50% de árido reciclado, la disminución en la relación agua/cemento, que mantiene la misma porosidad, debería ser de un 0,1 menor.

- El ataque por sulfatos ensayado comparativamente en hormigones de referencia y hormigones con 20%, 50% y 100% de árido grueso reciclado, demuestran que el árido reciclado no introduce cambios en el comportamiento del hormigón. Predomina, pues, el efecto del cemento sulforresistente presente en todos los hormigones. El árido reciclado no aumenta la sensibilidad del hormigón respecto al ataque por sulfatos.
- Se observa una disminución de la permeabilidad a los gases con el tiempo, especialmente para los hormigones con menor grado de incorporación. No obstante, a medida que el hormigón reciclado evoluciona con el tiempo, la tendencia se aproxima a la que representa el comportamiento del hormigón de control. Si se pretende obtener, con una incorporación de un 20%, la misma permeabilidad a los gases, se deberá reducir la relación agua/cemento del hormigón de control en, aproximadamente 0,025 cuando la relación agua/cemento del hormigón de control sea de 0,65. Si la relación agua/cemento del hormigón de control es menor, la reducción que mantiene invariante la permeabilidad se ve reducida y si ésta es mayor será necesaria una reducción de mayor cuantía.
- Se recomienda que para una relación agua total/cemento de hasta 0,60 la sustitución de árido reciclado sea como máximo 50%, y teniendo como referencia que para este caso los cambios sobre la fluencia del hormigón pueden aumentar hasta un 50% (coeficiente de fluencia 1,50), manteniendo los valores de resistencia a compresión del hormigón de control. Cuando la sustitución es del 100% el valor de la fluencia aumenta en un rango mucho más amplio, por lo que dentro de estas recomendaciones solo se contempla su uso cuando la relación agua total/cemento sea menor que 0,55 y bajo la comprobación de estudios específicos de fluencia para el caso.
- En cuanto al comportamiento a fatiga del hormigón, en términos generales, la incorporación de un 20% de árido reciclado reduce, en el peor de los casos, el límite a fatiga en un 10%, siendo mayor la diferencia cuando la relación agua/cemento efectiva es alta. En este sentido, cabe destacar que a medida que la relación agua/cemento efectiva disminuye, los valores del límite a fatiga tienden a aproximarse entre sí, independientemente del grado de sustitución. Como

conclusión final, los resultados obtenidos evidencian que el límite a fatiga está influenciado por la presencia de árido reciclado. El hormigón de control confeccionado con árido natural es capaz de resistir infinito número de ciclos siempre que el valor mayor de sollicitación no supere el 50% de su resistencia a compresión. Este porcentaje disminuye considerablemente cuando se emplea grava reciclada, no garantizándose vida infinita para cargas repetidas con un valor máximo superior al 40% de su resistencia a compresión.

- La forma de las curvas tensión-deformación de los hormigones reciclados es similar a la de los hormigones convencionales. Sin embargo, se detectó un desplazamiento a la derecha en las curvas tensión-deformación de los hormigones reciclados, atribuible a modificaciones en los siguientes parámetros: el módulo de elasticidad longitudinal, la deformación de pico y la deformación última. Estos desplazamientos son más significativos cuando el porcentaje de sustitución es alto. La deformación longitudinal en los hormigones reciclados aumenta con el porcentaje de árido grueso reciclado utilizado, por lo que la pendiente de las curvas tensión-deformación disminuye. Esto significa que los valores del módulo disminuyen, incrementándose, consecuentemente, las deformaciones de pico y última. Hormigones reciclados con el 100% de sustitución experimentaron una reducción del módulo del 20,2% y un incremento del 20,5% y 22,6% de la deformación de pico y última, respectivamente.
- La capacidad adherente de los hormigones reciclados de igual dosificación que los convencionales es inferior y, además, disminuye con el porcentaje de árido grueso reciclado empleado. Utilizando ensayos tipo pull-out, las tensiones de adherencia media se reducen cuando se opta por la sustitución total del árido. Adicionalmente, se ha observado que cuando se trabaja con hormigones de mejores prestaciones las pérdidas en el comportamiento adherente por utilización de árido reciclado se reducen.
- Se han desarrollado ensayos bajo carga lenta para aproximarse al fenómeno del cansancio bajo tensiones elevadas. Los ensayos se han realizado bajo control por carga en compresión y en tracción, empleando velocidades de carga 1000 veces inferiores a las de los ensayos normalizados. En todos los casos se han comparado hormigones convencionales con sus respectivos reciclados en los

que se sustituye el 100% de las fracciones de árido grueso convencional por árido grueso reciclado procedente de hormigón. Las pérdidas de resistencia en los ensayos lentos no superan, ni a compresión ni a tracción, los valores convencionales conocidos, siendo similares a las obtenidas con hormigones convencionales.

1.4.8. Experiencias en la utilización de hormigón reciclado

En España, son varias las actuaciones relevantes en las que se ha utilizado árido reciclado como sustituto del árido natural en hormigones estructurales. A continuación, se presentan dos de las actuaciones más importantes, hasta la fecha, y sus principales características.

1.4.8.1. Puente de Marina Seca del Forum 2004 de Barcelona

El puente de Marina Seca [104], una de las obras emblemáticas del FORUM 2004 de Barcelona, fue construido utilizando hormigón reciclado en alguno de sus elementos. Se utilizó un árido reciclado de un único origen (fracción 4/25 mm), con una absorción media de 6,7%, exento de cloruros y sulfatos. Más del 95% del árido reciclado eran partículas de hormigón. La cantidad de finos inferiores a 0,063 mm fue del 1% y el aporte de finos menores de 4 mm fue del 10%, lo que obligó a una ligera corrección en la cantidad de arena.

Se utilizó una sustitución del 20% de árido reciclado previamente presaturado, con una grado de saturación entre el 80% y el 90%.

La resistencia obtenida fue de 47,8 MPa, y los resultados de los ensayos de penetración de agua fueron adecuados. La puesta en obra de este hormigón tampoco presentó ninguna dificultad.

1.4.8.2. Puente atirantado sobre el río Turia

La experiencia piloto del puente atirantado entre Manises y Paterna [105], que finalizó en el año 2008, propone la utilización de hormigón reciclado en un puente atirantado de hormigón armado, situado en Manises (Valencia), propiedad de la Diputación de Valencia.

Este puente se ha ejecutado como sustitución de una estructura de hormigón ya existente. El objetivo del proyecto es reciclar el material de hormigón procedente de esta estructura para la fabricación de parte del hormigón de la nueva estructura, utilizando una sustitución del 20% del árido natural por árido reciclado en el hormigón de un tramo de la losa.

El árido reciclado así producido se utiliza como sustitución de una parte del árido grueso natural, en un porcentaje no superior al 20%. El árido mezcla deberá cumplir las especificaciones que establece la EHE para los áridos naturales.

- Calidad del hormigón de origen f_{cm} deberá ser superior a 25 MPa.
- Resistencia máxima hormigón reciclado $f_{cm} < 50$ MPa.
- Estudios específicos en ambientes distintos al I y IIb.

1.4.9. Experiencias en otros países

Fuera de España la experiencia práctica en la utilización de hormigón reciclado es más amplia [104]. Algunos de los proyectos llevados a cabo se resumen a continuación.

En 1988 se empleó aproximadamente 500 m³ de hormigón reciclado en la construcción de los estribos de un viaducto en la carretera RW 32 cerca de Meppel (Holanda). En 1990 se construyó un segundo viaducto en esa misma zona. En este caso se utilizó árido grueso reciclado (en un porcentaje del 20%) para todas las partes de hormigón del viaducto. La cantidad total de hormigón reciclado que se usó fue de 11.000 m³.

En las obras de la compuerta del puerto en las proximidades de Almelo (Holanda), en 1988, se emplearon unas 2000 t de hormigón reciclado para la construcción de la losa de hormigón bajo el agua.

Debido a los buenos resultados obtenidos en la utilización de hormigón reciclado, desde 1991 se alenta la utilización de árido de hormigón reciclado en un porcentaje del 20% de la fracción gruesa en todos los proyectos de hormigón, con excepción de las estructuras de hormigón pretensado.

La primera experiencia práctica en la que se utilizó hormigón con áridos reciclados en el Reino Unido se llevó a cabo en Watford en el año 1995 durante la construcción de un bloque de oficinas. Se empleó hormigón triturado procedente de la demolición de un edificio de 12 plantas en el centro de Londres. El árido grueso se utilizó para la construcción de cimentaciones, pilares y forjados.

Para la ampliación del puerto de Amberes (Bélgica), se procedió en 1987 a la demolición de varios muros del puerto y la construcción de una compuerta mayor. La demolición se realizó con explosivos, originando unos 80.000 m³ de escombros. Por consideraciones tanto ambientales como económicas se optó por la utilización de los escombros de hormigón para la fabricación de hormigón reciclado. El hormigón producido disponía de suficiente resistencia a compresión (35 MPa) y retracción aceptable (<150 μm/m). Para mejorar la trabajabilidad del hormigón se optó por presaturar los áridos reciclados antes de incorporarlos a la mezcla, corrigiendo así la cantidad de agua añadida. Después de casi 15 años de servicio, la estructura no ha presentado problemas de durabilidad.

En Alemania se usó árido reciclado para la construcción de grandes bloques de hormigón como elementos decorativos en el Centro de Exposiciones de Magdeburgo (1999). Estos bloques se encuentran en el exterior y en contacto con agua. En este caso, solo se empleó árido grueso reciclado. En 1993-1994 se construyó la sede de la Fundación Alemana para el Medioambiente (Deutsche Bundesstiftung Umwelt). Se empleó árido reciclado en la construcción de los elementos estructurales de hormigón, realizándose una estricta selección de los áridos reciclados y un exhaustivo control de calidad. Se utilizaron 290 kg/m³ de cemento Pórtland CEM I 42,5 R; el árido grueso era reciclado (con tamaños comprendidos entre 4 y 32 mm) y el árido fino arena natural. La mezcla contenía además 70 kg/m³ de cenizas volantes y plastificante. Con un contenido de agua de 201 kg/m³ se consiguió una resistencia cúbica de 35 MPa.

Uno de los proyectos más significativos sobre reutilización de escombros de demolición para la fabricación de hormigón ha tenido lugar en Dinamarca. La construcción del "Great Belt Link", una gran red de enlace entre Dinamarca y Suecia, suponía la modificación de la red de carreteras existentes y la demolición de varias estructuras, entre las que se encontraba la demolición de un puente de hormigón

armado. En esta demolición se llevaron a cabo distintas investigaciones sobre técnicas de demolición y utilización del hormigón triturado como árido para un nuevo hormigón. Finalmente, los escombros fueron procesados y empleados en la fabricación de hormigón que se utilizó para la construcción de “La casa reciclada”, en Odense, y las cimentaciones de pantallas acústicas. Esta casa reciclada consiste en un bloque de 14 apartamentos de tres pisos con sótano.