



UNIVERSIDAD DE BURGOS
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

**DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS
E INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEL TERRENO**

TESIS DOCTORAL

**PROPIEDADES FÍSICAS Y DURABILIDAD DE
MORTEROS ALIGERADOS CON ARCILLA
EXPANDIDA Y AGREGADOS CON ÁRIDOS
RECICLADOS**

CARMELO MUÑOZ RUIPEREZ

DIRECTORES DE TESIS:

Dr. D. Ángel Rodríguez Sáiz

Dra. D^a. Verónica Calderón Carpintero

Burgos, Diciembre de 2015



D. Ángel Rodríguez Sáiz, Profesor Titular Doctor y **Dña. Verónica Calderón Carpintero**, Profesora Titular Doctora, del Área de Construcciones Arquitectónicas del Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la Construcción y del Terreno de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos.

INFORMAN:

Que la presente Memoria titulada **“ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y DURABILIDAD DE LOS MORTEROS ALIGERADOS CON ARCILLA EXPANDIDA Y AGREGADOS CON ÁRIDOS RECICLADOS”** se ha realizado en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la Construcción y del Terreno de la Universidad de Burgos, bajo su dirección, por el Ingeniero de Edificación y Arquitecto Técnico D. Carmelo Muñoz Ruiperez y autorizan su presentación para que sea calificada como **TESIS DOCTORAL**.

Burgos, 8 Septiembre de 2015

Fdo.: Dr. Ángel Rodríguez Saiz Fdo.: Dra. Verónica Calderón Carpintero

A los que buscan...

Si ya no es que esto sea burla pesada, no me puedo persuadir que hombre de tan buen entendimiento como son, o parecen, todos los que aquí están, se atrevan a decir y afirmar que ésta no es bacía, ni aquella albarda; más como veo que lo afirman y dicen, me doy a entender que no carece de misterio el porfiar una cosa tan contraria de lo que nos muestra la misma verdad y la misma experiencia; por voto a tal, que me den a entender que ésta no sea bacía de barbero, y ésta albarda de asno.

Don quijote de la Mancha. Capítulo XLV.

Gracias a todas las personas a mí alrededor, en especial a Chelo y a mis hijas Marina y Sofía, que han sido cómplices en esta nueva aventura y sin los cuales no hubiese podido lograrla.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no es fruto de un simple trabajo individual, sino que es el resultado de una suma de apoyos y esfuerzos después de un largo periodo de trabajo de muchos años. A todas las personas que, aunque no sean conscientes de ello, han hecho posible finalizar esta Tesis Doctoral, les doy toda mi gratitud.

En primer lugar, he de agradecer la dirección y orientación realizadas por mis dos directores: Dr. Ángel Rodríguez Sáiz y Dra. Verónica Calderón Carpintero. Mi agradecimiento por haber hecho renacer en mí las ganas de aprender e inculcarme el espíritu científico e investigador. Gracias a su apoyo, tanto académico como personal, consejos, dedicación y trabajo ha sido posible la realización de este trabajo.

A mis compañeros de Laboratorio de Materiales de Construcción y Construcciones Arquitectónicas, José Luis Campo, Pablo Campos de la Fuente, José Miguel Solaguren-Bescoa y Jorge Hernández Bagaces, por vuestra ayuda en la realización de los ensayos, por las horas compartidas en el laboratorio, y por aquellos momentos que cambiaron el color de un mal día.

También quiero agradecer a todo el personal del Departamento de Construcciones Arquitectónicas por su ayuda y entrega a lo largo de esta Tesis Doctoral, en especial a Isabel Santamaría, por su paciencia y colaboración.

No puedo olvidar, en estos agradecimientos, a Francisco Fiol, mi compañero de investigación, docencia, y sobre todo amigo, por su ayuda, apoyo y amistad en todos los momentos difíciles a lo largo de todos estos años.

Finalmente agradecer a las empresas que han contribuido generosamente suministrando las materias primas empleadas: Cementos Alfa, Planta de Reciclado Igelcar, Artepref, Argex y Arte y Madera.

RESUMEN:

La utilización masiva de los recursos naturales por el hombre para su provecho ha sido una constante a través de los tiempos, colaborando de manera inconsciente en la degradación del entorno y en el progresivo deterioro del medio ambiente.

La generación de Residuos de Construcción y Demolición (RCDs) va estrechamente ligada a la actividad constructiva, una parte importante de estos residuos son depositados en vertederos, provocando un impacto visual y paisajístico, además de un impacto ecológico negativo, al rechazarse materiales que, con un adecuado tratamiento, podrían ser reciclados. Este problema se ve agravado desde el año 2008 con la crisis financiera, ya que más del 50% de los escombros producidos, incluso algunos potencialmente peligrosos, acaban en vertederos ilegales. Por lo tanto, es necesaria una correcta gestión de los residuos para conseguir reducir en lo posible las cantidades generadas, y aprovechar el potencial que tienen como recurso.

Uno de los usos más extendidos de los RCDs es su utilización para la producción de áridos reciclados en sustitución del árido natural. Estos áridos reciclados pueden clasificarse según su tamaño en dos tipos: aquellos cuyo tamaño de grano máximo es de 4 mm, y los que tienen tamaño de grano mínimo mayor de 4mm. El estudio de la utilización de áridos reciclados se ha orientado al uso de los áridos gruesos, encontrado aplicaciones en la fabricación de hormigones estructurales, y eliminando los áridos finos.

Este trabajo trata de encontrar una aplicación para esta fracción fina, fabricando morteros ligeros con diferentes tipos de áridos reciclados.

La investigación que se recoge en la presente Tesis es el desarrollo de un proceso experimental para el diseño de morteros ligeros fabricados con áridos reciclados finos procedentes de escombros de hormigón y mixtos.

Previamente se caracterizaron los diferentes materiales utilizados en las mezclas, con el objetivo de conocer las referencias de partida, tanto para el estudio de las propiedades mecánicas de los morteros diseñados como de su comportamiento a la durabilidad frente a los agentes agresivos externos.

En primer lugar, se diseñó un mortero convencional, denominado mortero base (MB), el cual fue aligerado con áridos de arcilla expandida en diferentes porcentajes y mezclas dando lugar al mortero de referencia (MR) para, posteriormente, sustituir el árido natural del mortero de referencia por árido reciclado de hormigón (ARH) y mixto (ARM) originando los morteros de diseño.

Se han realizado ensayos para comparar las propiedades de los “*morteros base*”, de los “*morteros ligeros de referencia*” realizados con áridos naturales, y de los “*morteros de diseño*” realizados con áridos reciclados, con el fin de evaluar las variaciones que presentaban los “*morteros de diseño*” respecto a los “*morteros base*” y de los “*morteros de referencia*”.

Se han evaluado los efectos del aligeramiento y la utilización de áridos reciclados en la durabilidad de los morteros así diseñados, analizando la capilaridad, la resistencia frente a atmósferas agresivas, resistencia a los ciclos de humedad sequedad y resistencia a los ciclos de y hielo-deshielo. El estudio confirma la viabilidad de la elaboración de morteros aligerados con arcillas expandidas y con áridos reciclados.

Como complemento a la investigación realizada se diseña una prueba industrial que permita utilizar los materiales ensayados y conocer su comportamiento en una situación real de prestación y determinar su viabilidad comercial. La unidad de obra elegida es un forjado de madera, donde los morteros formarán parte del relleno de la capa de compresión.

Determinada la aptitud de los morteros prescritos para formar parte de forjados diseñados, se procede a evaluar su viabilidad de utilización mediante un estudio económico.

PALABRAS CLAVE:

Áridos reciclados, morteros, ligeros, forjados

ABSTRACT:

The massive use of natural resources by man to their advantage has been constant through time, unconsciously collaborating in the degradation of the environment and the progressive deterioration of the environment.

The generation of waste from construction and demolition waste (CDW) is closely linked to the construction activity, an important part of these wastes are deposited in landfills, causing a visual and landscape impact, and a negative ecological impact, rejected materials with appropriate treatment, could be recycled. This problem is compounded since 2008 with the financial crisis, as more than 50% of the debris produced some potentially dangerous even end up in illegal dumps. Therefore, proper management of waste is necessary to reduce as much as possible to get the amounts generated, and realize the potential they have as a resource.

One of the most widespread uses of CDW is its use for the production of recycled aggregates to replace natural aggregate. These recycled aggregates can be classified by size into two types: those whose maximum grain size is 4 mm, and those with higher minimum grain size of 4mm. The study of the use of recycled aggregates has been directed to the use of coarse aggregates found applications in the manufacture of structural concrete, and removing fine aggregates.

This paper attempts to find an application for this fine fraction, light mortars manufactured with different types of recycled aggregates.

The research contained in this thesis is the development of an experimental process for the design of light mortars made from recycled fine aggregate concrete rubble and mixed.

Previously the different materials used in mixtures with the aim of starting to know the references for both the study of the mechanical properties of mortars and their behavior designed to durability against external aggressive agents were characterized.

First, a conventional mortar, called base (MB) mortar, which was lightened with aggregates of expanded clay in different percentages and damage

mixtures place the reference mortar (MR) to subsequently replace the natural aggregate mortar designed reference for recycled aggregate concrete (ARH) and mixed (ARM) originated mortars design.

We have conducted tests to compare the properties of the "mortar base", the "light mortars Reference" made with natural aggregates, and the "mortars design" made with recycled aggregates, in order to evaluate changes had the "design mortars" regarding "mortars" and "reference mortars".

We have evaluated the effects of lightening and the use of recycled aggregates on the durability of mortars and designed by analyzing the capillary resistance against aggressive atmospheres, resistance to moisture dry cycles and cycles resistance and freeze-thaw. The study confirms the feasibility of developing mortar lightened with expanded clay and recycled aggregates.

Complementing the research conducted industrial evidence to use materials tested and know their behavior in a real situation of supply and determine its commercial viability is designed. The unit of work chosen is a wooden slab, where the mortars form part of the filling of the compression layer.

Determined fitness prescribed mortars designed forged part, we proceed to evaluate its feasibility of using an economic survey.

KEYWORDS:

RECYCLED AGGREGATES, MORTAR, LIGHTWEIGHT, FORGED

INDICE

Capítulo 1: MOTIVACIÓN	3
Capítulo 2: OBJETIVOS	13
2.1. OBJETIVO GENERAL	13
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
Capítulo 3: ESTADO DEL ARTE.....	17
3.1. MORTEROS DE CEMENTO	17
3.1.1. Origen y evolución de los morteros	17
3.1.2. Definición y clasificación	19
3.1.3. Morteros de albañilería.....	21
3.1.4. Componentes de los morteros.....	24
3.1.5. Propiedades de los morteros	30
3.1.6. Propiedades de los morteros en estado fresco	31
3.1.7. Propiedades de los morteros endurecidos	37
3.2. MÉTODOS DE ALIGERAMIENTO DE LOS MORTEROS	45
3.2.1. Introducción	45
3.2.2. Clasificación de los materiales celulares	48
3.2.3. Procedimientos para aligerar materiales	48
3.2.4. Procedimientos de aligeramiento de morteros	51
3.2.5. Morteros aligerados con agregados ligeros.....	54
3.3. ARCILLA EXPANDIDA	60
3.3.1. Introducción	60
3.3.2. Proceso de producción.....	61
3.3.3. Propiedades.....	64
3.4. ÁRIDOS RECICLADOS	66
3.4.1. Introducción	66

3.4.2. Clasificación del árido reciclado en función a su composición	68
3.4.3. Procesos de producción de áridos reciclados	72
3.4.4. Propiedades físicas de los áridos reciclados.....	86
3.4.5. Composición química de los áridos reciclados.....	111
3.4.6. Propiedades químicas de los áridos reciclados	113
3.4.7. Contenido en cloruros	117
3.4.8. Contaminantes e impurezas.....	120
3.4.9. Pérdidas por calcinación.....	123
3.4.10. Los áridos reciclados en la normativa española.....	123
3.4.11. Normativa de áridos reciclado en la UE	125
3.4.12. Otras normativas	128
3.5. MORTEROS RECICLADOS	129
3.5.1. Introducción	129
3.5.2. Propiedades del mortero endurecido	129
3.5.3. Porosidad.....	129
3.5.4. Resistencia a compresión	130
3.5.5. Resistencia a flexión	134
3.5.6. Retracción.....	135
3.5.7. Adherencia del mortero a las fábricas	138
3.5.8. Durabilidad frente ataque por sulfato de magnesio	139
3.5.9. Reacción álcali-árido.....	141
3.5.10. Durabilidad frente a ciclos de hielo-deshielo	143
3.5.11. Morteros de revoco/enlucido con áridos reciclados	143
Capítulo 4: CARACTERIZACIÓN MATERIALES	149
4.1. INTRODUCCIÓN	149
4.2. CEMENTO	149
4.3. ÁRIDOS	152
4.3.1. Árido natural.....	152
4.3.2. Áridos reciclados	155

4.3.3. Granulometría	158
4.3.4. Contenido en finos	161
4.3.5. Módulo de finura.....	162
4.3.6. Densidad y absorción	162
4.3.7. Resistencia a la fragmentación.....	165
4.3.8. Clasificación de los componentes del ARH fracción gruesa	167
4.3.9. Mortero adherido.....	169
4.3.10. Composición química de los áridos.....	173
4.3.11. Cloruros soluble en agua - Método Volhard	174
4.3.12. Pérdidas por calcinación	177
4.3.13. Sulfatos solubles en agua en áridos reciclados	178
4.3.14. Sulfatos solubles en ácido	181
4.3.15. Contaminantes ligeros	184
4.3.16. Solubilidad en agua	187
4.3.17. Contenido en materia orgánica.....	189
4.4. AGUA.....	190
4.5. ARCILLA EXPANDIDA	191
Capítulo 5: PROGRAMA EXPERIMENTAL	197
5.1. METODOLOGÍA.....	197
5.2. DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES	199
5.3. DOSIFICACIONES EXPERIMENTALES.....	200
5.4. PROCEDIMIENTO OPERATORIO.....	201
5.4.1. Preparación de los materiales.....	202
5.4.2. Dosificación de los componentes.....	202
5.4.3. Amasado.....	205
5.4.4. Preparación de las probetas.....	206
5.5. SELECCIÓN DOSIFICACIÓN DE ALIGERAMIENTO	207
5.6. ESTUDIO DE LAS DOSIFICACIONES.....	214

5.6.1. Dosificaciones.....	214
5.6.2. Granulometrías.....	217
5.7. PROPIEDADES DEL MORTERO FRESCO	218
5.7.1. Consistencia.....	218
5.7.2. Aire ocluido	221
5.7.3. Densidad aparente del mortero fresco	223
5.8. PROPIEDADES DEL MORTERO ENDURECIDO	227
5.8.1. Densidad del mortero endurecido	227
5.8.2. Resistencias mecánicas	231
5.8.3. Retracción.....	241
5.8.4. Tomografía axial computerizada (TAC)	246
5.8.5. Porosimetría de intrusión de mercurio (PIM)	249
5.8.6. Absorción de agua	253
5.9. DURABILIDAD	257
5.9.1. Capilaridad – Método Fagerlund.....	257
5.9.2. Resistencia a la abrasión	263
5.9.3. Resistencia al dióxido de azufre. Ensayo Kesternich.....	267
5.9.4. Comportamiento frente a ciclos de humedad-sequedad	272
5.9.5. Comportamiento frente a solución salina.....	277
5.9.6. Resistencia a la heladicidad.....	281
5.9.7. Resistencia a la carbonatación	291
Capítulo 6: PUESTA EN OBRA.....	301
6.1. INTRODUCCIÓN	301
6.2. MONTAJE DE LOS FORJADOS.....	302
6.3. AMASADO Y PUESTA EN OBRA	304
6.4. ROTURA DE LAS PROBETAS.....	308
6.5. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.....	312
6.6. CONCLUSIONES	318
Capítulo 7: ESTUDIO ECONÓMICO	323

7.1. INTRODUCCIÓN	323
7.2. VALORACIÓN CUANTITATIVA	325
7.2.1. Precios simples unitarios.....	325
7.2.2. Precios auxiliares de los morteros	327
7.3. VALORACIÓN CUALITATIVA.....	330
Capítulo 8: CONCLUSIONES	335
8.1. CONCLUSIONES	335
8.2. REFLEXIONES	338
Capítulo 9: LÍNEAS FUTURAS	343
Capítulo 10: BIBLIOGRAFÍA	347

CAP. I MOTIVACIÓN

Capítulo 1: MOTIVACIÓN

La utilización masiva de recursos naturales por el hombre para su propio provecho ha sido una constante a través de los tiempos, colaborando de manera inconsciente en la degradación paulatina de su entorno, y en el progresivo deterioro del medio ambiente. Parece obvia la necesidad de establecer políticas encaminadas al mejor aprovechamiento de los recursos y su reutilización, en los casos que sea posible.

La protección del medio ambiente y la conservación de los recursos naturales es uno de los objetivos a seguir para garantizar el progreso de las generaciones futuras. Por otro lado, cada día es mayor la presión de colectivos ecologistas, y la concienciación ciudadana respecto de la necesidad de potenciar el reciclaje de materiales que han cumplido su vida útil, transformando un residuo en un recurso. Con ello, se reduciría el impacto ambiental producido por las explotaciones de materias primas provenientes de recursos naturales, fomentando así la protección, al ser bienes limitados, y se reducirían los destinados acopios a vertederos.

Ante esta situación, el Ministerio de Medio Ambiente promulgó en el año 2001 el I Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (Ministerio de Medio Ambiente 2001)¹, que finalizó en el año 2006. Sus objetivos, algunos de ellos muy ambiciosos, fueron cumplidos parcialmente. Cabe destacar el aumento de porcentaje de reciclado y el número de plantas fijas y móviles.

En el año 2007 entro en vigor el Plan Nacional Integrado de Residuo (Ministerio de Medio Ambiente 2009)², que finalizará en 2015, en el que se estima en 2 kg los residuos generados por habitante y día en España.

¹ Ministerio de Medio Ambiente (2001). Plan Nacional de Residuos (2001-2006). BOE nº 166 pág. 25305-25313.

² Ministerio de Medio Ambiente (2009). "Plan Nacional Integrado de Residuos (2008-2015)." BOE nº 49 de 26 de Febrero de 2009: 19893-20016.

Dentro del mismo se desarrolla el Segundo Plan Nacional de Residuos y Demolición (II PNRCD). Entre sus objetivos cualitativos está el reducir en origen la generación de residuos de construcción y demolición (RCDs), valorizar todo lo posible, crear una red de infraestructuras necesarias, establecer un registro estadístico de RCDs, y clausurar o adaptar los vertederos a la Normativa. Como objetivos cuantitativos pretende gestionar y controlar el 95% RCDs a partir de 2011 y alcanzar un nivel de reutilización del 15% en 2011, siendo este del 40% al finalizar el Plan.

De acuerdo con la hoja de ruta para una Europa eficiente en recursos, la Unión Europea (UE) debería alcanzar para el año 2020 una situación en la que los residuos se gestionen como recurso. En el camino hacia una economía circular que se alimenta de los residuos como materia prima, la prioridad más alta debe ser el reciclaje. En 2010 en la Unión Europea se generaron 2,5 millones de toneladas de residuos sólidos, de los cuales solo el 45% se recupera y el resto se destinan a su deposición en vertederos o a la incineración.

Los residuos de construcción y demolición, comúnmente denominados escombros, se definen por primera vez en la legislación española en el Real Decreto 105/2008, hoy en día la Ley 22/2011 (Ministerio de Medio Ambiente 2011)³ lo especifica como "cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseché o tenga obligación de desechar y se genere en una obra de construcción y demolición".

La generación de Residuos de Construcción y Demolición va estrechamente ligada a la actividad constructiva (según Eurostat Data Center on Waste, en el año 2012 los RDC suponen el 32% del total de los residuos generados); una parte importante de estos residuos son depositados en vertederos, provocando un impacto visual y paisajístico, además de un impacto ecológico negativo, al rechazarse materiales que con un adecuado tratamiento podrían ser reciclados. Este problema se ve agravado desde el

³ Ministerio de Medio Ambiente (2011). "Ley 22/2011. Residuos y suelos contaminados." BOE nº 181 de 29 de Julio de 2011.

año 2008 con la crisis financiera, ya que más del 50% de los escombros producidos, incluso algunos potencialmente peligrosos, acaban en vertederos ilegales (Ministerio de Medio Ambiente 2009)⁴. Por lo tanto, resulta necesaria una correcta gestión de los residuos para conseguir reducir en lo posible las cantidades generadas, y aprovechar el potencial que tienen como recurso.

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística, el Sector de la Construcción en España generó en el año 2011, 32,7 millones de toneladas, frente a los 40,1 millones generados en 2009. Este retroceso es debido al fuerte descenso en la actividad constructiva.

La mayor cantidad de los residuos generados corresponde a los residuos minerales, tanto los calificados como no peligrosos como los peligrosos. Dentro de los residuos no peligrosos destacan los residuos químicos, equipos electrónicos, vehículos desechados y madera.

RESIDUOS GENERADOS SECTOR CONSTRUCCIÓN - Año 2011 - Miles Tn

Residuos generados por tipo	No peligrosos	Peligrosos	Total
Residuos minerales	31.808,7	132,4	31.941,1
Residuos mezclados	226,2	0,1	226,3
Metálicos	193,8	0,1	193,9
Madera	133,4	0,5	133,9
Plásticos	83,1		83,1
Papel y cartón	67,4		67,4
Químicos	5,8	19,4	25,2
Equipos electrónicos y vehículos	2,3	2,2	4,5
Vidrio	2,1	0,2	2,3
Caucho	0,5		0,5
Sanitarios y biológicos	0,2		0,2
Otros	3,1	0,2	3,3

Tabla 1.1: Residuos generados en el Sector de Construcción. Año 2011.

Los RCD suelen ser fundamentalmente inertes, y están constituidos básicamente por tierras y áridos mezclados, piedras, restos de hormigón,

⁴ Ministerio de Medio Ambiente (2009). "Plan Nacional Integrado de Residuos (2008-2015)." BOE nº 49 de 26 de Febrero de 2009: 19893-2001.

ladrillos, yesos, materiales cerámicos, maderas y en general, todos los desechos generados en las actividades de la construcción, reforma, demolición o mantenimientos de edificios o infraestructuras, conocidos habitualmente como “escombros”.

Todos ellos aparecen codificados según la Lista Oficial de Residuos (Orden MAM 304/2002 2002)⁵ . La composición media de los RCDs que son procesados para su reciclaje, según el Plan de Gestión de RCDs de la Comunidad de Madrid (Comunidad de Madrid 2006)⁶, puede observarse en la Tabla 1.2.

COMPONENTES DE LOS RCD	
Fracciones minerales (o áridas)	% sobre total
Ladrillos, azulejos y cerámicos	54%
Hormigón	12%
Piedra	5%
Arena, grava y otros áridos	9%
Total fracciones minerales (o áridas)	80%
Fracciones no minerales (o no áridas)	
Material clasificable	
Papel	0,5%
Plástico	3%
Madera	6%
Metales	5%
Vidrio	0,5%
Total material clasificable	15%
Voluminosos de obra	
Cartonaje	1%
Plástico Industrial	1%
Madera	3%
Total voluminosos de obra	5%
Total	100%

Tabla 1.2: Composición de los RCD según Comunidad de Madrid 2006.

⁵ Orden MAM 304/2002 (2002). Lista Europea de Residuos (LER). BOE nº43, 6494-6515.

⁶ Comunidad de Madrid (2006). Plan Gestión Residuos de la Comunidad de Madrid 2006-2016.

Como se puede observar, la fracción mayor es la de los minerales, con un 80% sobre el total. Dentro de esta fracción, los componentes que predominan son los de naturaleza cerámica. Este porcentaje es superior al de otros países de la Unión Europea, en los que la proporción de materiales cerámicos se encuentra próxima al 30 % (Böhmer 2008)⁷.

En la Comunidad Europea, la gestión de RCDs se lleva a cabo de una manera desigual. Países como Holanda, Dinamarca o Bélgica reciclan en torno al 90% de los residuos. En otros como Alemania, Reino Unido y Austria reciclan en torno al 65%, mientras que este porcentaje en España se encuentra en apenas un 10%.

La escasez de áridos, el incremento de penalizaciones por vertido, e incluso su prohibición, son causas que favorecen el reciclado. En la Tabla 1.3 pueden observarse algunos datos estadísticos europeos, procedentes de varias fuentes consultadas (Böhmer 2008; Toscano Machado 2008; Sánchez de Juan and Alaejos 2010; Ulloa Mayorga 2012)^{7 8 9 10}.

Los primeros estudios documentados sobre áridos reciclados se realizaron sobre la caracterización de los materiales y sus propiedades físicas y se remontan a la época posterior de la Segunda Guerra Mundial. Tenían como objetivo la búsqueda de aplicaciones para los materiales de desecho que provenían de los escombros originados por la destrucción de las ciudades debido a los bombardeos (Buck A.D. 1977; Nixon P.J. 1978; Poon C.S., Kou S.C. et al. 2002)^{11 12 13}

⁷ Böhmer, S.(2008). "Aggregates case study. "Final Report referring to contract nº 150787 F1SC-AT. Viena.

⁸ Toscano Machado, E. A. (2008). Gestión de la Ciencia y Tecnología para el reciclado de los desechos sólidos de construcción, Cuba.

⁹ Sánchez de Juan, M. and M. P. Alaejos (2010). Ficha Técnica sobre los residuos de construcción y demolición. Actualización del catálogo de residuos utilizables en la construcción. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino.

¹⁰ Ulloa Mayorga, V. A. (2012). Durabilidad de hormigones armados, con árido reciclado: Una evaluación de la corrosión en un ambiente marino, Unversitar Politécnica de Valencia.

¹¹ Buck A.D. (1977). "Recycled Concrete as Source of Aggregate." Journal of American Concrete Institute 74(5): 212-219.

GESTIÓN DE RCD EN LA UNION EUROPEA (2008)				
País	Prod. Mill. T.	Kg/habit.	% Reciclado	% Vertido
Holanda	26	1625	95	5
Bélgica	14	1400	91	9
Alemania	73	913	80	20
UK	89	1485	60	40
Austria	7	1000	53	47
Francia	48	740	25	70-80
España	35	745	10	90
Portugal	-	-	<5	>95
UE	360	720	35	65

Tabla 1.3: Gestión de RCDs en Europa (2008).

En Japón se inicia la investigación sobre las aplicaciones de áridos reciclados por la Sociedad de Edificadores Contratistas (BSF Project) y el Ministerio de Construcción, como alternativas a la crisis del petróleo de 1973.

A partir de los años 80 en Estados Unidos, Europa y Australia se utilizan de forma masiva en la industria vial, mientras que en España los índices de reutilización de los áridos reciclados son bajos y todavía más bajo aún como material para la fabricación de hormigón, quedando su uso reducido al ámbito de la estabilización de bases y rellenos.

El reciclado de materiales procedentes de RCDs es cada vez más frecuente dentro del ámbito de la construcción, presentando dicha actividad expectativas de crecimiento. El impulso de estas actividades depende, en gran medida, de las variaciones del bajo precio de los áridos naturales y del precio del canon de vertido de los residuos.

¹² Nixon P.J. (1978). "Recycled Concrete as an Aggregate for Concrete." *Materiales y Construcción* 11: 371-378.

¹³ Poon, C. S., S. C. Kou, et al. (2002). "Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks." *Construction and Building Materials* 16(5): 281-289.

Uno de los usos más extendidos de los RCDs es su utilización para la producción de áridos reciclados en sustitución del árido natural. Estos áridos reciclados pueden clasificarse según su tamaño en dos tipos: aquellos cuyo tamaño de grano máximo es de 4 mm, y los que tienen tamaño de grano mínimo mayor de 4mm.

El estudio de la utilización de áridos reciclados se ha orientado al uso de los áridos gruesos, encontrando aplicaciones en la fabricación de hormigones estructurales, y eliminando los áridos finos que, según algunos estudios (Martins 2005)¹⁴, suponen entre el 20% al 50% de los residuos de construcción.

La actual Norma española de Hormigón Estructural EHE-08 (Ministerio de Fomento 2008)¹⁵ incorpora un el Anejo 15: "Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados", en el que considera el uso de una fracción máxima del 20% de árido reciclado en sustitución de árido natural. Por otro lado la EHE-08 en su Anejo 18: "Hormigones de uso no estructural", permite la fabricación de hormigón no estructural en elementos prefabricados con un porcentaje del 100% de áridos reciclados, siempre que satisfaga una resistencia a compresión mínima de 15 N/mm² y las especificaciones del Anejo 15.

La actual EHE-08 solo considera los áridos procedentes de escombros de hormigón y en su fracción gruesa, quedando fuera de normativa los hormigones fabricados con árido reciclado fino y los hormigones fabricados con áridos reciclados de naturaleza distinta del hormigón.

Como se ha visto, en la composición media de los RCDs, los ladrillos, azulejos y materiales cerámicos forman el 54%, frente al 26% del resto de fracciones áridas (hormigón, árido, grava, etc.), y que la fracción fina de los áridos reciclados supone 20% al 50% de los residuos de construcción. Si se

¹⁴ Martins, I. (2005). "Use of the fraction."

¹⁵ Ministerio de Fomento (2008). "Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08."

quiere aprovechar la totalidad de los RCDs, hay que considerar aplicaciones que incluyan los áridos reciclados mixtos y la fracción fina de éstos.

Se han realizado estudios experimentales para la fabricación de hormigones y morteros con áridos reciclados mixtos o cerámicos, pero todavía no dado lugar a la publicación de una normativa nacional. A nivel internacional existen países con normativa sobre el uso de estos áridos pero existen muchas discrepancias en sus propiedades, por lo que resulta necesario unificarlas para que su utilización resulte viable.

A la vista de los planteamientos anteriores, resulta necesario realizar estudios experimentales tanto para determinar las propiedades del árido reciclado mixto, como de los hormigones o morteros fabricados con él, para determinar su idoneidad.

Como consecuencia, la utilización de los áridos reciclados debe incrementarse en el futuro, por lo que, antes de acometer Proyectos de Investigación orientados a su uso en construcción, debemos conocer el Estado del Arte en esta materia.

CAP. II OBJETIVOS

Capítulo 2: OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Esta Tesis Doctoral surge con el objetivo de favorecer el reciclado de los Residuos de Construcción y Demolición, valorizando su uso en la fabricación de morteros, para contribuir así a mejorar la eficiencia del Sector de la Construcción y reducir su impacto ambiental.

El objetivo fundamental de este estudio es determinar los parámetros necesarios del Proceso Experimental que permita el diseño de un “mortero ligero con adición de áridos reciclados finos, para su utilización como material de relleno en diferentes elementos de edificación”.

El mortero deberá tener una serie de exigencias mínimas para su empleo, como poseer una determinada resistencia mecánica, durabilidad, trabajabilidad, ligereza, y un coste económico competitivo.

Para su materialización, en primer lugar se realizará un profundo estudio bibliográfico, actualizando el conocimiento de los morteros ligeros y de los morteros fabricados con áridos reciclados, para diseñar un mortero que combine ambas prestaciones.

Para ello, se han utilizado las bases de datos de revistas científicas relacionadas con éste ámbito de estudio. Además, también se recabará toda la normativa de aplicación para utilizarla en la realización del proceso experimental de caracterización, tanto de los materiales como del mortero obtenido.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

La consecución del objetivo principal, es decir, el diseño de un mortero ligero en el que el árido natural sea sustituido por árido reciclado, precisa definir las etapas a seguir para conseguir los objetivos específicos que se indican a continuación:

- Evaluar los diferentes métodos de aligeramiento de los morteros de cemento y determinar cuál es el sistema más adecuado para el uso combinado de los áridos reciclados finos.
- Determinar los porcentajes de mezcla de los elementos aligerantes y conocer cómo influyen en las propiedades del mortero.
- Estudiar las propiedades de los áridos finos reciclados que se utilizaran en la fabricación de morteros de cemento, para poder compararlas con las de los áridos finos convencionales. De esta forma, se puede conocer cómo influyen en las propiedades de los morteros.
- Evaluar las propiedades que presentan los morteros ligeros con áridos reciclados, dependiendo de la naturaleza y tipo del árido reciclado utilizado (hormigón o mixto).

Para diseñar el mortero ligero con áridos reciclados se realizarán los ensayos que permitan determinar las propiedades de los morteros ligeros de referencia fabricados con áridos naturales y las de los que contienen áridos reciclados, con el objetivo de conseguir morteros ligeros reciclados con propiedades semejantes a las de los morteros ligeros convencionales.

De igual forma, se expondrán los procedimientos de dosificación y fabricación de los morteros y una metodología de ensayos que permita analizar los efectos de los distintos parámetros, para poder detectar con garantía su influencia en las propiedades ensayadas.

CAP. III ESTADO DEL ARTE

Capítulo 3: ESTADO DEL ARTE

3.1. MORTEROS DE CEMENTO

3.1.1. Origen y evolución de los morteros

En la actualidad, se define como mortero a la mezcla compuesta de uno o varios conglomerantes inorgánicos, áridos, agua, y a veces, adiciones y/o aditivos, de acuerdo a las normas UNE-EN 998-1 (AENOR 2010)¹⁶ y UNE-EN 998-2 (AENOR 2012)¹⁷.

Estas mezclas constan de:

- Un material inerte o “*árido*”, generalmente arena de distinta composición y granulometría.
- Un material aglutinante, ligante, conglomerante o “*aglomerante*”, que imparte plasticidad a la mezcla y que, por lo tanto, permite su moldeado y elasticidad al endurecer, lo que le confiere cohesión y resistencia mecánica.
- Otros materiales añadidos eventualmente o “*aditivos*”, para mejorar o modificar su comportamiento.

Sin embargo, a lo largo de la historia de la construcción se han empleado diferentes materiales como conglomerantes en la fabricación de morteros y hormigones.

El ejemplo más antiguo conocido es el “mortero de tierra” utilizado como recubrimiento en las paredes de la villa Neolítica de *Çatal Hüyük*, en Turquía (6000 a.C.), compuesto por cenizas y restos de huesos, pero sin conglomerante incorporado a la mezcla. En esta villa también se encontró una

¹⁶ AENOR (2010). "UNE-EN 998-1. "Especificaciones para los morteros de albañilería. Parte 1: Morteros para enlucido y revoco".

¹⁷ AENOR (2012). UNE-EN 998-2. "Especificaciones para morteros de albañilería. Parte 2: Morteros de albañilería".

de las primeras aplicaciones de la cal apagada, como pintura de cuevas, sola o mezclada con otros materiales.

En el norte de Chile en el año 5000 a.C. aparecen las primeras obras de piedra unidas por un conglomerante hidráulico procedente de la calcinación de algas. Estas fábricas de piedra formaban las paredes de las chozas utilizadas por los indígenas (Alejandre Sánchez 2002)¹⁸.

Los constructores griegos y romanos descubrieron que ciertos materiales volcánicos (cenizas), mezclados con caliza y arena producían un mortero de gran resistencia, capaz de soportar la acción del agua, dulce o salada. Estas cenizas las encontraron en un lugar llamado *Puteoli*, conocido hoy como *Puzzioli*, por lo que este cemento se vino a llamar “cemento de puzolana”. Con este tipo de mezclas los romanos construyeron multitud de bóvedas, muros de ladrillo, acueductos, etc. Estos morteros eran estables en el agua, y sus propiedades son similares a los actuales conglomerados hidráulicos. (Gárate Rojas 1994)¹⁹.

En el siglo V, tras la caída del Imperio Romano, se paraliza el desarrollo de los morteros, salvo en la civilización musulmana, donde se utilizan mezclas de yeso y cal en la realización de enlucidos, relieves y losas talladas de los monumentos islámicos andaluces.

En la Edad Media no se producen innovaciones importantes en la técnica de fabricación de morteros. Durante los siglos IX a XI los morteros fabricados eran de baja calidad, poco homogéneos y con peores propiedades que los morteros romanos, debido a la pérdida de las técnicas de cocción de la cal que estos utilizaban. Hasta el siglo XVIII sólo se utilizan los morteros de cal, yesos y materiales puzolánicos (tierra de diatomeas, etc.).

En 1756, Jhon Smeaton fue comisionado para construir el faro de Eddyston, en la costa de Cornwall, encontrando que el mejor mortero se

¹⁸ Alejandre Sánchez, F. (2002). Tesis Doctoral. "Historia, caracterización y restauración de morteros". Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción de la Universidad de Sevilla.

¹⁹ Garate Rojas, I. (1994). Artes de la Cal. D. G. d. B. A. y. Archivos. Madrid, Ministerio de Cultura.

obtenía cuando se mezclaba puzolana con caliza con un alto contenido de material arcilloso. Sheaton fue el primero en conocer las propiedades químicas de la cal hidráulica.

En el siglo XIX, Louis Vicat realizó una serie de investigaciones que describían el comportamiento hidráulico de las mezclas de caliza y arcilla, y propuso en 1818 el sistema de fabricación del cemento que se sigue empleando en la actualidad. Louis Vicat encaminó la fabricación de cemento por medio de mezclas calizas y arcillas dosificadas en las proporciones convenientes y molidas conjuntamente. Este sistema es del conocido como de “vía húmeda” y orientó el inicio de los actuales procesos de fabricación del cemento.

En 1824 James Parker y Joseph Aspdin patentan el cemento Portland, dándose este nombre por motivos comerciales, por su color y por su dureza que recuerdan la de las piedras de Portland, materia que obtuvieron mediante la calcinación a alta temperatura de una caliza arcillosa.

Desde finales del siglo XIX se perfecciona el proceso de fabricación que abocó posteriormente a los actuales procedimientos de obtención de los cementos Portland, material íntimamente ligado a la producción de los morteros actuales.

La tecnificación del material en el siglo XX produce en las últimas décadas una disminución de los morteros hechos “in situ” a favor de los morteros industriales. Finalmente, la exigencia de una mejor calidad y de un control exhaustivo de propiedades de los morteros, ha determinado en los últimos años una fuerte tendencia hacia el desarrollo del denominado “mortero en seco”.

3.1.2. Definición y clasificación

Los morteros se definen, como se ha visto en el punto anterior, como mezclas de uno o más conglomerantes inorgánicos, áridos, agua y a veces adiciones y/o aditivos. El Diccionario de la Real Academia de la Lengua (RAE) define mortero como: *“Conglomerado o masa construida por arena, conglomerante y agua que puede contener además algún aditivo”*.

Entendemos por mortero fresco el que se encuentra completamente mezclado y listo para su uso (Rodríguez Mora 2003)²⁰. El mortero tiene la peculiaridad de ser empleado en muy distintas aplicaciones en las actividades de edificación, debido a los siguientes factores:

- Adaptabilidad formal: el mortero se puede adaptar en fresco a cualquier superficie y volumen, forma e intersticio.
- Facilidad de aplicación: a diferencia de otros materiales no se requiere la utilización de herramientas especiales para su puesta en obra. Pueden ser aplicados manualmente o por proyección.
- Prestaciones diseñables: podemos adaptar sus propiedades a las exigencias que se deseen, variando su composición o dosificación.

Los morteros principalmente tienen un uso enfocado hacia la albañilería, si bien pueden tener otras aplicaciones derivadas de las prestaciones específicas de los morteros especiales (Río Merino, Santa Cruz Astorqui et al. 2.005)²¹.

La selección de las materias primas y los sistemas de producción permiten actualmente diseñar morteros con propiedades para usos concretos en función a sus prestaciones. Actualmente, el Reglamento de Productos de la Construcción (RPC) (Reglamento 305 2011)²² impone los morteros tengan marcado CE, mediante el cual el fabricante declara las prestaciones del mismo, asumiendo la responsabilidad sobre la conformidad del producto con las prestaciones declaradas, y sobre el cumplimiento de los requisitos aplicables del RPC, así como los de otra legislación de armonización que sea de aplicación.

²⁰ Rodríguez Mora, O. (2003). "Morteros. Guía general." Afam (Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero).

²¹ Río Merino, M. d., J. Santa Cruz Astorqui and M. González Cortina (2.005). "Morteros aligerados con arcilla expandida: Influencia de la granulometría en la adición de fibras de vidrio AR en el comportamiento mecánico."

²² Reglamento 305 (2011). Reglamento 305/2011. Reglamento de Productos de Construcción, DOUE: Diario Oficial de la Unión Europea.

La designación de los morteros con marcado CE, es la siguiente:

- Morteros de albañilería.
- Morteros de revoco/enlucido. Monocapas (OC).
- Adhesivos cementosos (Morteros cola).
- Morteros autonivelantes.

Debido a que el estudio de este trabajo está enfocado a la fabricación de morteros aligerados con áridos reciclados, nos centraremos en estudiar los morteros de albañilería.

3.1.3. Morteros de albañilería

Los morteros de albañilería según la norma UNE-EN 998-2 (AENOR 2012)²³ se pueden clasificar:

- a) Según su concepto:
- Morteros diseñados: son aquellos cuya composición y sistema de fabricación se ha elegido por el fabricante con el fin de obtener las propiedades específicas (concepto de prestación). La prestación corresponde principalmente a la resistencia, por lo que se designan con la letra "M" seguido de la resistencia a compresión en N/mm².

CLASIFICACIÓN DE LOS MORTEROS SEGÚN SU RESISTENCIA							
	M-1	M-2,5	M-5	M-10	M-15	M-20	M-d
Resi. N/mm ²	1	2,5	5	10	15	20	d
"d" es una resistencia a compresión > 25 N/mm ² declarada por el fabricante							

Tabla 3.1: Clasificación de los morteros según su resistencia.

- Morteros de receta o prescritos: son aquellos que se fabrican en unas proporciones determinadas, y cuyas propiedades dependen de los componentes que se han declarado (concepto de receta).

²³ AENOR (2012). UNE-EN 998-2. "Especificaciones para morteros de albañilería. Parte 2: Morteros de albañilería".

- b) Según su método de fabricación:
- Morteros hechos “in situ”: estos morteros están compuestos por los componentes primarios, dosificados, mezclados y amasados con agua en la obra.
 - Morteros industriales semiterminados: dentro de este grupo existen dos grupos :
 - Morteros predosificados: son aquellos cuyos componentes básicos (conglomerante o conglomerantes y áridos) son dosificados independientemente en fábrica y suministrados en el lugar de utilización, donde se mezclan en las proporciones y condiciones especificadas por el fabricante, y se amasan con el agua precisa hasta obtener una mezcla homogénea para su utilización. Estos morteros pueden tener aditivos y/o adiciones en sus correspondientes compartimentos.
 - Morteros premezclados: son aquellos cuyos componentes se han mezclado y dosificado en fábrica para su posterior suministro al lugar de construcción, donde se les puede añadir otro u otros componentes especificados por el fabricante, como por ejemplo, el cemento. Se mezclan en las proporciones y condiciones especificadas por el fabricante y se amasan con el agua precisa hasta obtener una mezcla homogénea para su utilización.
 - Mortero industrial: es un mortero dosificado, mezclado y, en su caso amasado con agua en fábrica, y suministrado al lugar de uso. Puede ser “mortero seco” (solo requiere adición de agua) o “mortero húmedo” (se suministra listo para su uso).

Una ventaja de los morteros en seco es su forma de suministro mediante silos o sacos, que protege perfectamente el contenido, fabricándose el mortero que va a ser consumido, no desaprovechando ninguna cantidad.

La clasificación de los morteros de albañilería según la Norma UNE-EN 988-2 (AENOR 2012)²⁴ se recoge en la Tabla 3.2.

CLASIFICACIÓN DE LOS MORTEROS PARA ALBAÑILERÍA		
Morteros para albañilería según el concepto	Morteros para albañilería diseñados	Morteros cuya composición y sistema de fabricación se han elegido por el fabricante, con el fin de obtener las propiedades específicas (concepto de prestación)
	Morteros para albañilería prescritos	Se fabrican con unas proporciones determinadas, y las propiedades dependen de estas proporciones (concepto de receta)
Morteros para albañilería según las propiedades y/o utilización	Morteros para albañilería para uso corriente (G)	No poseen características especiales
	Morteros para albañilería para juntas y capas finas (T)	Diseñado con un tamaño máximo del árido menor o igual al valor que figura especificado
	Morteros para albañilería ligero (L)	Cuya densidad, en estado endurecido y seco, es inferior o igual a 1.300 Kg/m ³
Morteros para albañilería según el sistema de fabricación	Morteros para albañilería hecho en una fábrica (mortero industrial)	Son los morteros dosificados y mezclados en fábrica. Estos morteros pueden ser : Mortero seco : siendo este una mezcla preparada que solo requiere la adición de agua Mortero húmedo : se suministra listo para su empleo
	Morteros para albañilería semiterminado hecho en una fábrica	Pueden ser : Mortero predosificado: sus componentes se dosifican totalmente en fábrica y se suministran al lugar de utilización don se mezclan de acuerdo a las especificaciones indicadas por el fabricante Mortero premezclado de cal y arena : sus componentes se han dosificado, mezclado por completo en fábrica, y se suministra al lugar de utilización en donde se añaden otros componentes especificados o suministrados por la fábrica
	Morteros para albañilería hecho en obra	Mortero donde los componentes individuales son dosificados y mezclados en obra

Tabla 3.2: Clasificación de los morteros según Norma UNE-EN 998-2²⁴.

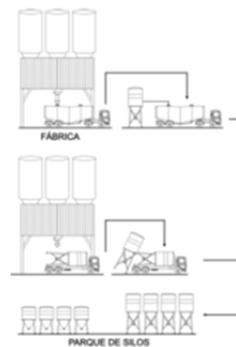


Figura 3.1: Esquema de suministro de los morteros en seco.

²⁴ AENOR (2012). UNE-EN 998-2 : "Especificaciones para morteros de albañilería. Parte 2 : Morteros de albañilería".

A continuación vamos a proceder al estudio de los componentes del mortero, estableciendo los rasgos más característicos de cada uno de ellos.

3.1.4. Componentes de los morteros

3.1.4.1. Conglomerantes

En construcción entendemos por conglomerante el material que tiene la capacidad de unir unos materiales entre sí, de una o varias sustancias, dando cohesión al conjunto por efecto de la reacción química de sus componentes, que determinan su fraguado y endurecimiento. Esta reacción química da lugar a una serie de transformaciones internas del material que origina nuevos compuestos (Rodríguez Mora 2003)²⁵.

Los conglomerantes utilizados en los morteros podemos dividirlos en:

a) Cales: dentro de las cales tenemos dos tipos, según UNE-EN 459-1 (AENOR 2011)²⁶:

- Cal aérea: la cal hidratada (apagada) endurece únicamente por la reacción con el CO₂ atmosférico. Esta cal, amasada con agua y expuesta a la acción del aire, fragua en primer lugar por cristalización del hidróxido de calcio, y luego endurece al carbonatarse los cristales por la acción del CO₂. El proceso es lento y el producto es poco resistente a la acción del agua.
- Cal hidráulica: la cal hidráulica amasada con agua forma pastas que fraguan y endurecen a causa de reacciones de hidrólisis e hidratación de sus constituyentes. El proceso es más rápido que en el caso de la cal aérea y da lugar a productos hidratados, resistentes al aire y agua.

b) Cementos:

²⁵ Rodríguez Mora, O. (2003). "Morteros. Guía general." Afam (Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero).

²⁶ AENOR (2011). UNE-EN 459-1. "Cales para construcción. Composición, especificaciones y criterios de conformidad".

Están formados por mezclas de caliza, arcilla y yeso, que son materiales muy abundantes en la naturaleza. Actualmente, son los conglomerantes hidráulicos más utilizados en construcción.

Las características de los cementos vienen reguladas por la Instrucción para la Recepción de Cementos RC-08 (Ministerio de Fomento 2009)²⁷. Existen varios tipos: cementos comunes (CEM), cementos blancos (BL), resistentes a los sulfatos (SR) y/o al agua de mar (MAR), cementos especiales (ESP).

En el mercado podemos encontrar cementos especiales para albañilería, cuyas características y proporciones se definen en la norma UNE-EN 413-1 (AENOR 2011)²⁸. Dado que el cemento comúnmente utilizado en albañilería es el cemento Portland, procedemos a explicar con mayor profundidad como actúa.

Cuando mezclamos el cemento Portland con una cantidad conveniente de agua se forma inmediatamente una masa de carácter plástico, que es moldeable, pero que con el tiempo va aumentando su viscosidad y su temperatura. La cantidad de agua de la mezcla es importante, ya que determinará el valor de la consistencia. Cuanta mayor cantidad de agua contenga, la mezcla será más fluida y menos resistente; por el contrario, si no hay suficiente agua para hidratar el cemento, obtendremos una mezcla seca poco trabajable.

Al cabo de un tiempo, que puede oscilar entre 15 a 120 minutos dependiendo de la naturaleza de los componentes empleados, la masa tiende a volverse rígida, dando lugar al "principio de fraguado". Cuando se inicia el fraguado, el mortero debe de estar colocado, ya que toda operación de reamasado puede perjudicar las propiedades de la mezcla.

²⁷ Ministerio de Fomento (2009). "Instrucción para la Recepción de Cementos RC-08".

²⁸ AENOR (2011). "UNE-EN 413-1. Cementos de albañilería. Composición, especificaciones y criterios de conformidad".

Desde el principio del fraguado la resistencia mecánica de la masa aumenta al formarse fases cristalinas insolubles, deshidratando parcialmente la masa, hasta llegar a ser completamente indeformable. Esta fase se la conoce como "fin de fraguado". El tiempo que pasa desde el inicio del fraguado y el fin del fraguado depende de la naturaleza de los componentes, y puede oscilar entre los 45 minutos y las 10 horas.

A partir del final del fraguado se produce el "periodo de endurecimiento". En esta fase la resistencia mecánica aumenta considerablemente, debido a la consolidación final mediante la formación de fases cristalinas que rellenan los huecos y por la evaporación del agua sobrante. A los 28 días, en condiciones normalizadas, se obtiene la resistencia a compresión, que definirá la clase del mortero.

3.1.4.2. Áridos

Los áridos son materiales granulares inorgánicos de tamaño variable, y de naturaleza inerte, es decir, que por sí solos no reaccionan con los componentes del cemento o agentes físicos-químicos externos (aire, agua, hielo, etc.) (Rodríguez Sáiz 2008)²⁹.

Su influencia en las características y propiedades físicas del mortero es determinante ya que, como material, representan la mayor parte del volumen total del mortero obtenido.

La industria de la construcción consume el 88% de los áridos que se fabrican, mientras que el 12% restante se reparten entre otros tipos de industrias (Luaces 2007)³⁰. Las principales aplicaciones de los áridos en la industria de la construcción son: la fabricación de morteros, hormigones, prefabricados (ladrillos, vigas, bordillos, aceras, etc.), bases, subbases, aglomerados asfálticos, etc.

²⁹ Rodríguez Sáiz, A. (2008). Tesis Doctoral. "Fabricación de morteros de albañilería con escoria blanca de horno cuchara y su utilización en construcción".

³⁰ Luaces, C. (2007). "Los áridos y el cemento. El recorrido de los materiales". C. d. E. e. I. Tecnológica, Comunidad de Madrid.

Desde el año 2006 el consumo de áridos en España ha caído más de un 81% debido a la disminución de la demanda de productos de construcción como consecuencia de la crisis económica, resultando que en el año 2013 el consumo de áridos fue de unos 92 millones de toneladas, y de 87 en el año 2014, de acuerdo a las estadísticas de la Asociación Nacional de Empresas Fabricantes de Áridos (ANEFA) en su informe anual a 2014.

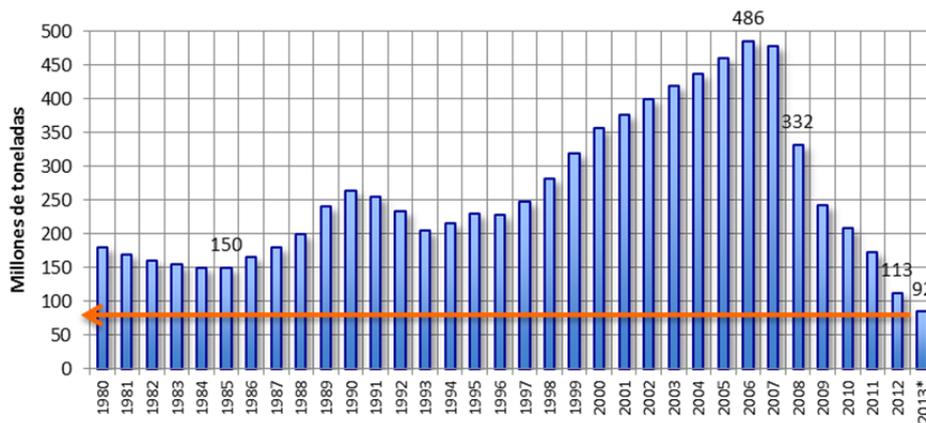


Tabla 3.3: Consumo de áridos para construcción 1980-2013 según ANEFA.

Los áridos se clasifican en función de su tamaño de grano en arenas (árido fino) y gravas (árido grueso). Se denomina arena al material granular que pasa por un tamiz 4 mm de luz de malla. La grava es el material granular que queda retenido en dicho tamiz.

La granulometría de los áridos, es decir, la distribución de los diferentes tamaños de las partículas que la forman, es un factor determinante en las propiedades finales de los morteros, ya que los tamaños finos rellenan los huecos dejados por los de mayor tamaño hasta alcanzar la máxima compacidad.

Existen un conjunto de propiedades químicas que deben poseer los áridos que se emplean en la fabricación de morteros, como son el contenido en cloruros, sulfatos o las posibles reacciones álcali-árido, que pueden degradar la calidad final del material. Las propiedades de los áridos adecuados para la

fabricación de los morteros viene dada por la norma UNE-EN 13.139 (AENOR 2003)³¹, en la cual se fijan unos requisitos:

- Requisitos geométricos: tamaño máximo del árido, granulometría, forma de las partículas, contenido y calidad de los finos.
- Requisitos físicos: densidad de las partículas, absorción de agua, resistencia al hielo y deshielo.
- Requisitos químicos: contenido en cloruros, componentes que contienen azufre o alteran la velocidad del fraguado o endurecimiento del mortero. Para áridos artificiales se establece además el contenido máximo de sustancias solubles en agua y la pérdida por calcinación.

Podemos clasificar los áridos según la norma UNE-EN 13.139 (AENOR 2003)³¹ en :

- Áridos naturales: son de origen mineral y han sido sometidos únicamente a un proceso mecánico. Dentro de estos podemos destacar:
 - Áridos granulares: se obtienen en graveras y han sido sometidos a un proceso de lavado y clasificación. Debido a su forma se les denominan "áridos rodados".
 - Árido machaqueo: se obtienen en canteras por trituración de rocas, molienda y posterior clasificación. Presentan una textura de superficies rugosas y aristas vivas.
- Áridos artificiales: son de origen mineral, y están constituidos por subproductos o residuos de procesos industriales (escorias siderúrgicas, cenizas volantes, etc.).
- Áridos reciclados: se obtienen mediante el tratamiento de materiales que han sido utilizados en la construcción (derribos de edificaciones, estructuras, etc.).

³¹ AENOR (2003). "UNE-EN 13.139. Áridos para morteros".

3.1.4.3. Agua

Este componente es el que confiere plasticidad a la mezcla para que sea trabajable y es el responsable de las acciones químicas que se producen durante la hidratación del conglomerante, dándole rigidez y resistencia. También cumple la función de lubricar y mojar las partículas de árido, facilitar su moldeo y compactación.

La cantidad de agua de amasado necesaria para obtener un valor de consistencia determinado depende del tipo de conglomerante utilizado, de la inclusión de aditivos en las mezclas o de la temperatura que las rodea. El aumento de la cantidad de agua incrementa la porosidad y la permeabilidad, disminuye la resistencia mecánica e incrementa el riesgo de fisuración por retracción.

El agua a emplear en el amasado debe ser inocua y no contener sustancias perjudiciales que afecten a las propiedades del mortero. "A priori" se puede afirmar que las aguas aptas para el consumo son válidas, pero deberá comprobarse previamente su composición.

3.1.4.4. Aditivos

Los aditivos son elementos que se le añaden a la masa del mortero durante la mezcla con la finalidad de mejorar sus características tanto en fresco como en endurecido, como, por ejemplo, mayor plasticidad, aire oculto, mayor tiempo de utilización, etc. (Venuat 1972)³². La norma UNE-EN 998-2 (AENOR 2012)³³ define aditivo como "Material añadido en pequeñas cantidades para obtener modificaciones de las propiedades".

³² Venuat, M. (1972). "Aditivos y tratamientos de morteros y hormigones".

³³ AENOR (2012). UNE-EN 998-2: "Especificaciones para morteros de albañilería. Parte 2 : Morteros de albañilería".

Los aditivos que se pueden utilizar en la fabricación de morteros están recogidos en la norma UNE-EN 934-2 (AENOR 2010)³⁴. Dichos aditivos pueden clasificarse en función a las características que aportan al mortero en:

- Aireantes: modifican el contenido de aire.
- Plastificantes: modifican la reología en estado fresco.
- Retardantes: modifican el tiempo de fraguado y/o endurecido.
- Hidrofugantes: minimizan la absorción de agua.
- Retenedores de agua: impiden que el mortero pierda agua con rapidez.
- Resinas: aumentan la adherencia, elasticidad e impermeabilidad.

3.1.4.5. Adiciones

La norma UNE-EN 998-2 (AENOR 2012)³⁵ define las adiciones como “Material inorgánico finamente dividido que se añade al mortero para mejorar o para obtener propiedades especiales”.

Las adiciones que se pueden incorporar a los morteros son cenizas volantes, escorias granulares, materiales puzolánicos, fillers minerales o humo de sílice. Incorporados a los morteros pueden modificar propiedades del cemento y afectar a su fraguado y endurecimiento y solo se aplican cuando se utilizan cementos puzolánicos CEM I.

3.1.5. Propiedades de los morteros

Al estudiar las prestaciones de un mortero, se pueden distinguir dos etapas diferentes en su estado físico, que se denominan “estado fresco” y “estado endurecido”.

Durante el “estado fresco” el mortero es plástico y trabajable, lo que nos permite su puesta en obra. Las propiedades del mortero fresco son determinantes ya que influyen en sus prestaciones finales.

³⁴ AENOR (2010). "UNE-EN 934-2. Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para morteros de albañilería. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado".

³⁵ AENOR (2012). UNE-EN 998-2: "Especificaciones para morteros de albañilería. Parte 2: Morteros de albañilería"

En el “estado endurecido” sus propiedades están fijadas por las prescripciones exigidas al mortero y por el cumplimiento de la normativa vigente (Rodríguez Mora 2003)³⁶.

3.1.6. Propiedades de los morteros en estado fresco

Se denomina estado fresco del mortero a la fase inmediatamente posterior a la mezcla de todos los componentes, y viene condicionado por las relaciones entre los componentes que lo integran. Esta relación se conoce con el nombre de consistencia y determina la facilidad de su puesta en obra o trabajabilidad.

La norma UNE-EN 1015-9 (AENOR 2007)³⁷ define la trabajabilidad como “El tiempo durante el cual un mortero puede ser manipulado sin añadir posteriormente agua”. La norma americana ASTM C 125 (ASTM 2007)³⁸ lo define como “La propiedad que determina el esfuerzo requerido para manipular una cierta cantidad de material recién mezclado, con la mínima pérdida de homogeneidad”.

En esta fase los componentes que forman parte del mortero son susceptibles de moverse independientemente entre ellos, lo que puede originar su pérdida de homogeneidad.

3.1.6.1. Consistencia

Podemos definir la consistencia como la fuerza de atracción entre los componentes del mortero (Shalom and Soroka 1964)³⁹.

Es también conocida como plasticidad e indica la trabajabilidad o manejabilidad del mortero.

³⁶ Rodríguez Mora, O. (2003). "Morteros.Guía general." Afam (Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero).

³⁷ AENOR (2007). UNE-EN 1015-9. “Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Determinación del periodo de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco”.

³⁸ ASTM (2007). Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. A. S. f. T. a. M. (ASTM). Philadelphia.

³⁹ Shalom, R. and I. Soroka (1964). "Consistency of cement-lime mortars." Materials Research and Standards 4: 465-471.

La consistencia de un mortero es variable en función a cantidad de agua empleada en su dosificación, que a su vez viene condicionada por la granulometría del árido empleado, los finos que éste contiene o de la inclusión de aditivos.

La consistencia de un mortero se determina mediante la mesa de sacudidas, tomando como referencia el procedimiento desarrollado en la norma UNE-EN 1015-3 (AENOR 2000)⁴⁰. Su valor viene medido por el escurrimiento de una probeta de mortero conformada con un molde tipo, que al sacudir la mesa sobre la que descansa se escurre. La media del diámetro en mm de la torta de mortero, es el valor que determina su consistencia en tres tipos: sólida, plástica y fluida. No obstante, pueden aparecer grados intermedios.

Mortero fresco	Consistencia	Designación
Seco	< 140 mm	S
Plástico	140 a 200 mm	P
Fluido	> 200 mm	F

Tabla 3.4: Clasificación de los morteros según su consistencia.

Una buena trabajabilidad se consigue con consistencias plásticas en las que los áridos se encuentran rodeados de la pasta de conglomerante, permitiendo que deslicen unos sobre otros con facilidad y con ausencia de tensiones producidas por el rozamiento de sus aristas, manteniendo al mismo tiempo la cohesión en su conjunto. Esta situación de equilibrio dinámico y completa ligazón es semejante a la existente entre dos placas de cristal con agua entre ellas (Valdehíta Roselló 1976)⁴¹.

Por el contrario, la consistencia seca se caracteriza por una interacción extrema de las partículas del árido, de modo que el rozamiento que se

⁴⁰ AENOR (2000). UNE-EN 1015-3. "Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Determinación de la consistencia del mortero fresco".

⁴¹ Valdehíta Roselló, M. T. (1976). "Morteros de cemento para albañilería." Patronato Juan de la Cierva de Investigación Técnica. Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento. Consejo Superior de Investigaciones Científicas nº 337.

produce entre ellos dificulta la trabajabilidad. La mezcla resultante es difícil de aplicar, por lo que para mejorar su puesta en obra se pueden añadir aditivos.

En la consistencia fluida las partículas del árido se encuentran inmersas en una masa líquida formada por el agua y el conglomerante, sin ningún tipo de cohesión o trabazón entre ellas. Las partículas se depositan en el fondo debido a la gravedad de la masa, fenómeno que es conocido como "segregación". En caso de necesitar consistencias fluidas recurriremos al empleo de superfluidificantes, que con menor cantidad de agua permiten obtener morteros no segregables.

3.1.6.2. Tiempo de aplicación

Es el tiempo durante el cual un mortero posee la suficiente trabajabilidad para ser utilizado sin adición posterior de agua, con el fin de contrarrestar los efectos de endurecimiento por el principio de fraguado. Se determina conforme a la Norma UNE-EN 1015-9 (AENOR 2007)⁴². Todas las características del mortero en estado fresco han de mantenerse durante este tiempo (Varela Blanco 2007)⁴³ (Rodríguez Mora 2003)⁴⁴.

3.1.6.3. Densidad aparente

Esta propiedad está influida por los materiales que conforman el mortero y por su contenido en aire. La densidad se determina conforme a la Norma UNE-EN 1015-6 (AENOR 1999)⁴⁵.

Los morteros aligerados o ligeros (su densidad es $\leq 1300 \text{ Kg/m}^3$) son más trabajables a largo plazo. Estos morteros son realizados mediante áridos

⁴² AENOR (2007). UNE-EN 1015-9. "Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Determinación del periodo de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco".

⁴³ Varela Blanco, T. (2007). "Estudios avanzados sobre cementos, morteros y hormigones." Instituto de Ciencias de la Construcción. Eduardo Torroja.

⁴⁴ Rodríguez Mora, O. (2003). "Morteros. Guía general." Afam (Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero).

⁴⁵ AENOR (1999). UNE-EN 1015-6. "Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Determinación de la densidad aparente del mortero fresco".

artificiales ligeros (arcilla expandida), o mediante al adición de aditivos aireantes.

3.1.6.4. Adherencia

La adherencia se define como la capacidad del mortero para absorber tensiones normales o tangenciales a la superficie interfase mortero-base. Esta propiedad es fundamental para garantizar una correcta trabazón entre el mortero y el soporte, evitando su desprendimiento y garantizando la durabilidad del conjunto.

La adherencia del mortero fresco es debida a las propiedades reológicas de la pasta del cemento y a la tensión superficial del conglomerante.

La tensión superficial del conglomerante depende de la concentración de conglomerante en la pasta. Cuanto menor la cantidad de conglomerante que tenga la pasta, menor será la tensión superficial, siendo mínima en las pastas muy puras, circunstancia que justifica la facilidad de mojar las superficies sobre las que el mortero no presenta ninguna adherencia (Luguez and Schumager 1971)⁴⁶ (Davison 1961)⁴⁷.

La adherencia máxima se consigue con morteros ricos en cemento, o también dosificados con arenas con mayor proporción de finos arcillosos en su granulometría. Sin embargo, el exceso de estos componentes puede perjudicar otras propiedades.

Para determinar de una forma práctica la adherencia de un mortero, resulta suficiente con colocar una pieza cerámica con éste y separarla al poco tiempo, observando si quedan o no restos de mortero en las caras de contacto. Cuando el mortero se agarra a las superficies de sentado y se crean puntos de unión, es el indicio que el mortero presenta una buena adherencia.

⁴⁶ Luguez, J. and J. Schumager (1971). "Observations sur la tenue de revêtements selles sur murs préfabriqués en béton d'argile expansée " Cahiers du C.S.T.B n° 122 (1057).

⁴⁷ Davison, J. L. (1961). "Loss of moisture from fresh mortars to bricks." Materials Research and Standards 1: 385-388.

Los factores que influyen en la adherencia del mortero en fresco son el tipo de conglomerante utilizado, la naturaleza del soporte y su grado de humectación. También la técnica con la cual se aplica, las condiciones de curado o la presencia de agentes agresivos (Alejandre Sánchez 2002)⁴⁸.

Para determinar la adherencia en morteros utilizados en revocos y enlucidos aplicados sobre soportes se utiliza la Norma UNE-EN 1015-12 (AENOR 2000)⁴⁹, donde se recoge el procedimiento para valorar la resistencia a la unión en la interfase mortero-base.

3.1.6.5. Contenido en iones cloruro

La presencia de iones cloruro solubles en el agua de amasado del mortero puede inducir procesos de corrosión en el caso de existir armaduras, así como la aparición de eflorescencias.

En morteros armados, la determinación del contenido máximo de iones se realiza de acuerdo con el procedimiento de análisis de la UNE-EN 1015-17(AENOR 2005)⁵⁰, o bien experimentalmente.

Para estos casos la Norma UNE-EN 988-2 (AENOR 2012)⁵¹ establece que el contenido de iones no superará el 0,1% de la masa de la muestra en seco, tomada conforme a la Norma UNE-1015-2 (AENOR 2007)⁵².

3.1.6.6. Capacidad de retención de agua

El agua es un componente esencial en la fabricación de los morteros, por lo que necesitamos retener la cantidad de agua necesaria para facilitar el

⁴⁸ Alejandre Sánchez, F. (2002). Tesis Doctoral. "Historia, caracterización y restauración de morteros". Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción de la Universidad de Sevilla.

⁴⁹ AENOR (2000). UNE-EN 1015-12. "Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Determinación de la resistencia a la adhesión de los morteros para revoco y enlucido endurecidos aplicados sobre soportes".

⁵⁰ AENOR (2005). UNE-EN 1015-17. "Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Determinación del contenido en cloruros solubles en agua de los morteros frescos".

⁵¹ AENOR (2012). UNE-EN 988-2. "Especificaciones para morteros de albañilería. Parte 2: Morteros de albañilería".

⁵² AENOR (2007). UNE-EN 1015-2. "Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Toma de muestra total de morteros y preparación de los morteros para ensayo".

proceso de hidratación del conglomerante. De esta propiedad depende también la trabajabilidad del mortero fresco.

La retención de agua se haya relacionada con la superficie específica de las partículas del árido fino, del conglomerante y, en general, con la viscosidad de la pasta.

Un mortero tiende a conservar el agua precisa para hidratar la superficie de las partículas de conglomerante y árido, así como las burbujas de aire ocluido que contiene. El agua que tenga en exceso la cederá por succión del soporte sobre la que se aplica (Alejandre Sánchez 2002)⁵³ (Rodríguez Mora 2003)⁵⁴.

Al aplicar un mortero sobre un soporte es fundamental que éste se encuentre humedecido, para que absorba el agua de amasado retenida por el mortero. De este modo se reduce la succión que el soporte realiza sobre el agua del mortero en fresco.

Otro factor que favorece la pérdida del agua de amasado del mortero es el ambiente climático que lo rodea, principalmente las altas temperaturas, el viento, o la combinación de ambas. Ante estas situaciones es recomendable reponer el agua succionada mediante el curado del mortero en su proceso de fraguado, ya que si no se consideran estos factores, un mortero bien dosificado y amasado puede llegar a desprenderse y no adquirir resistencia ni adherencia por falta de hidratación del cemento.

3.1.6.7. Contenido de aire

El aire que se encuentra presente en los morteros contribuye a conseguir mezclas más plásticas y a resistir mejor los ciclos de hielo-deshielo.

Esta propiedad influye en parámetros como la resistencia mecánica y en la durabilidad, debido a que los poros que se encuentran en el interior del

⁵³ Alejandre Sánchez, F. (2002). Tesis Doctoral. "Historia, caracterización y restauración de morteros". Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción de la Universidad de Sevilla.

⁵⁴ Rodríguez Mora, O. (2003). "Morteros. Guía general." Afam (Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero).

mortero ayudan a la comunicación y transporte de agentes externos (aire, agua, etc.) hacia el interior. Estos agentes externos pueden contener sustancias dañinas para el material, y esto se traduce en menores resistencias, mayores permeabilidades y menores adherencias (Rodríguez Mora 2003)⁵⁴.

3.1.7. Propiedades de los morteros endurecidos

Se puede definir mortero endurecido como un sólido conglomerado que presenta poros en su estructura, manteniendo una perfecta integración de todos sus componentes mediante fuerzas de adhesión, resultando un conjunto dinámico e isotrópico (Rodríguez Sáiz 2008)⁵⁵.

Las exigencias mecánicas establecidas y el ambiente al que va a estar expuesto un mortero determinan unas acciones externas a las que el mortero debe responder. Por ello debemos estudiar las propiedades del mortero en estado endurecido para ver cuál será su comportamiento frente a estos agentes y valorar su vida útil, en las que mantiene inalteradas sus propiedades.

3.1.7.1. Resistencia mecánica

El mortero como material tiene la función de unir otros materiales a un soporte o base, y garantizar la durabilidad de la unión en el tiempo.

Para garantizar esta propiedad, el mortero debe soportar las mismas sollicitaciones mecánicas (compresión, tracción o flexión) de los elementos donde esté dispuesto (Rodríguez Sáiz 2008)⁵⁵.

El Código Técnico de la Edificación en el Documento Básico SE-F (Estructuras de Fábrica) (Ministerio de Fomento 2006)⁵⁶, recoge los valores de la resistencia característica a compresión de las fábricas, en relación con la resistencia de la piezas y de los morteros que las configuran.

⁵⁵ Rodríguez Sáiz, A. (2008). Tesis Doctoral. "Fabricación de morteros de albañilería con escoria blanca de horno cuchara y su utilización en construcción".

⁵⁶ Ministerio de Fomento (2006). "Código Técnico de la Edificación. DB-SE-F Estructuras de fábrica".

Dentro de las resistencias mecánicas, las más importantes son la resistencia a flexión y la resistencia a compresión, siendo esta última una propiedad indispensable que todo mortero tiene que cumplir en función a su designación. La resistencia a flexión es importante para los morteros de revestimiento, mientras que para muros de fábrica será la resistencia a compresión el parámetro más determinante.

El método para determinar la resistencia a compresión y flexión de los morteros se define en la Norma UNE-EN 1015-11 (AENOR 2007)⁵⁷. Para el ensayo, se utilizan probetas prismáticas de (40x40x160) mm³, que se rompen a la edad de 28 días.

Los factores que condicionan la resistencia mecánica de un mortero de albañilería o para revestimiento de paramentos son:

- Dosificación del conglomerante: a mayor cantidad de conglomerante, la resistencia es mayor, no obstante, el exceso de conglomerante puede dar lugar a mezclas muy rígidas o retracciones excesivas. La sustitución de cemento por cal permite mezclas más plásticas con menores resistencias mecánicas.
- Relación agua-conglomerante: el incremento de agua de amasado reduce la resistencia mecánica por el aumento en la porosidad. Por el contrario, una reducción puede provocar una mala hidratación del cemento.
- Retención de agua: un soporte poroso, absorberá el agua de dosificación del mortero impidiendo la hidratación del cemento y su posterior fraguado. Por el contrario, un mortero que pierda agua rápidamente producirá el efecto anterior, al mismo tiempo que se crea una red capilar que afectará a su resistencia y durabilidad.
- Otros factores: el aire ocluido, dosificación de aditivos, adición de cal junto con el cemento.

⁵⁷ AENOR (2007). UNE-EN 1015-11. "Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido".

En cualquier de los casos, la puesta en obra y las condiciones de curado son determinantes en las cualidades finales de los morteros.

3.1.7.2. Adherencia

Podemos definir la adherencia en estado endurecido como la resistencia a tracción entre el mortero y un soporte definido.

Dicha adherencia depende esencialmente de los siguientes aspectos:

- Mortero: de las características y composición del conglomerante, sobre todo lo referente al tipo de cemento, granulometría del árido y la utilización de aditivos.
- Soporte y su preparación: de la textura del soporte, del grado de porosidad superficial del mismo, y de la distribución de poros abiertos en el interior del soporte.
- Forma de aplicación: la lechada del mortero debe penetrar en los poros para que se formen suficientes anclajes entre el mortero y el soporte que aseguren su estabilidad.

Existen dos tipos de adherencia:

- Adherencia físico-mecánica: fundamentada en la trabazón entre sólidos. El mortero tiene que tener la suficiente porosidad para que el cemento disperso y disuelto en el mortero penetre en los poros del soporte. Los soportes muy absorbentes sustraen agua del mortero, y no permiten la hidratación del cemento en la superficie que los une. Por el contrario, los soportes totalmente impermeables impiden la formación de anclajes y el agarre entre el mortero y el soporte.
- Adherencia química: fundamentada en la formación de enlaces químicos en la superficie de contacto entre el mortero y el soporte.

Existen diferentes trabajos (Davison 1961)⁵⁸ (Höberg 1967)⁵⁹, donde se estudian como interrelacionan los morteros con el soporte, dependiendo de la

⁵⁸ Davison, J. L. (1961). "Loss of moisture from fresh mortars to bricks." *Materials, Researchs and Standards* 1: 385-388.

⁵⁹ Höberg, E. (1967). "Mortar bond." *Bygghöbros Rapport*.

mayor o menor porosidad de éste. En sus investigaciones Davison estudia la succión prolongada del agua de amasado por la porosidad del material soporte y aconseja la humectación de las piezas soporte para impedir la absorción del agua del mortero. El trabajo realizado por Höberg estudia los efectos que se producen en un mortero cuando éste se dispone sobre un soporte poroso.

En soportes base con poca porosidad la lechada del cemento moja la superficie de contacto, formando una capa porosa que sirve de anclaje para el resto de componentes del mortero. Es por esto que los morteros utilizados para unir materiales o bases poco porosas deben tener una alta concentración de conglomerantes.

La determinación de la adherencia se realiza mediante un ensayo de arrancamiento directo perpendicular a la superficie del mortero, dicho proceso está definido por la Norma UNE-EN 1015-12 (AENOR 2000)⁶⁰ para morteros de albañilería, y en el caso de los morteros cola por la Norma UNE-EN 1348.

3.1.7.3. Retracción

Cuando se mezclan los componentes del mortero se inician los procesos de reacción entre el agua y los elementos anhidros del cemento, lo que da lugar al fraguado y el posterior endurecimiento de la masa. El agua sobrante de la reacción permite su trabajabilidad facilitando su aplicación (Skeen 1971)⁶¹.

Esta agua sobrante puede provocar una contracción en el mortero durante el proceso de fraguado y principio de endurecimiento que es lo que conocemos como "retracción".

Podemos distinguir tres tipos de retracciones en el proceso de fraguado y endurecimiento de un mortero:

⁶⁰ AENOR (2000). UNE-EN 1015-12. "Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Determinación de la resistencia a la adhesión de los morteros para revoco y enlucido endurecidos aplicados sobre soportes".

⁶¹ Skeen, J. W. (1971). "Experiments on the train penetration of brick work II: The effect of mortars type." Transactions and Journal of the British Ceramic Society 70: 631-6343.

- Retracción plástica: es una contracción por desecación que se produce durante el proceso de fraguado, cuando el mortero no es capaz de transmitir ni soportar tensiones producidas por la rápida evaporación del agua, debido al calor de hidratación del cemento. Da lugar a muchas fisuras muy próximas que se cruzan con aspecto de piel de cocodrilo y que no alcanzan gran profundidad. Esta fisuración frecuentemente se denomina “afogado”.
- Retracción hidráulica o de secado: es una contracción del mortero por evaporación del agua sobrante, que se produce al haber finalizado el fraguado. Si este tipo de contracción es intensa, produce un cambio volumétrico capaz de crear tensiones en zonas rígidas con dificultad para deformarse. La consecuencia es la aparición de fisuras con sus bordes, desconchados, levantados o abarquillados. Este fenómeno se ve agravado en los morteros con grandes espesores, con la riqueza del conglomerante y su finura, y con la relación agua-conglomerante. También puede verse influenciado por la naturaleza de los áridos, así como por las condiciones y el tipo de curado empleados.
- Retracción térmica: es una contracción que sufre el mortero por la variación de la temperatura en su masa durante el endurecimiento. El incremento de la temperatura inicial del mortero es debido al proceso de hidratación, por lo que en un mortero rico en cemento se originarán más variaciones de temperatura y mayores retracciones, que los realizados con bajas cantidades de cemento. Como consecuencia de esta variación de temperatura entre el inicio y el final del fraguado, el mortero podrá sufrir variaciones volumétricas y contracciones, dando lugar a fisuras superficiales. Estas fisuras favorecen el ataque de agentes agresivos, como el agua o sustancias contaminantes, afectando a la durabilidad del mortero.

3.1.7.4. Densidad

La densidad del mortero depende de la densidad de los materiales que lo componen: arenas, adiciones, etc. También de su granulometría, de la

naturaleza de los áridos y de la relación agua-cemento (Rodríguez Mora 2003)⁶².

La cantidad de cemento que contiene un mortero influye en su densidad, ya que a menor cantidad de éste menos cantidad de cemento que tiene que hidratarse, y por lo tanto, mayor será la cantidad de agua sobrante. Por consiguiente, se obtendrán mayores pérdidas de agua y menores densidades a menor contenido en cemento.

El agua de dosificación también influye en la densidad, ya que un exceso de agua dará lugar a un mortero más poroso, como consecuencia de su evaporación. Así, una mayor porosidad da lugar a morteros con menores densidades. La adición en los morteros de aditivos reductores de agua permite obtener morteros suficientemente densos, plásticos y trabajables, con bajo índice de poros, sin utilizar un exceso de agua en sus dosificaciones.

La naturaleza del árido utilizado es otro factor determinante de la densidad del mortero endurecido, ya que áridos muy compactos dan lugar a morteros más densos, mientras que los áridos ligeros presentan densidades más bajas. Los áridos porosos absorben parte del agua de dosificación, pero estudios realizados concluyen que esta absorción no es perjudicial, ya que esta agua es posteriormente cedida al conjunto de la mezcla, favoreciendo el curado en fase de fraguado y endurecimiento (GEHO-CEB 1997)⁶³.

La densidad de un mortero en estado endurecido se determina siguiendo el procedimiento operativo de la Norma UNE-EN 1015-10 (AENOR 2000)⁶⁴.

3.1.7.5. Absorción de agua

Todos los materiales presentan la propiedad de atraer y retener líquidos en su superficie o interior. La disposición de líquidos en las paredes externas que

⁶² Rodríguez Mora, O. (2003). "Morteros. Guía general." Afam (Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero).

⁶³ GEHO-CEB, G. E. d. H. (1997). "Hormigones de alta resistencia".

⁶⁴ AENOR (2000). UNE-EN 1015-10. "Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido".

delimitan el material es habitual en materiales que no tienen poros, o estos no están en contacto con el exterior. Este fenómeno se conoce como "absorción", y es propio de materiales no porosos y con superficies externas romas y lisas. En otros casos, los líquidos se depositan en el interior de los materiales a través de una red capilar que comunica los intersticios abiertos al exterior, son materiales con porosidad aparente, en los que su volumen real y aparente no coinciden (Rodríguez Sáiz 2008)⁶⁵.

La absorción depende como hemos visto de la estructura capilar del material, por tanto, cuanto más compacto sea un mortero, menor será la red capilar y, en consecuencia, presentará una menor absorción.

La absorción también determina la permeabilidad de un mortero, ya que cuando un mortero es permeable al agua, esta se transmitirá hacia el interior, originando la aparición de humedades por filtración y se favorece el tránsito de partículas o componentes no deseables para la durabilidad, como en el caso de las eflorescencias.

Para disminuir la absorción capilar se pueden añadir al mortero aditivos hidrofugantes, plastificantes y aireantes.

3.1.7.6. Permeabilidad al vapor de agua

Como se ha estudiado en el apartado anterior, los morteros expuestos a la acción del agua deben diseñarse para evitar su penetración por fenómenos de capilaridad o permeabilidad, garantizando su estanqueidad. Sin embargo, es necesario determinar el comportamiento de los morteros cuando en su interior se acumulan humedades producidas por fenómenos de condensación.

Estas humedades de condensación pueden precipitar cuando se supera la temperatura de rocío, produciéndose la aparición de manchas de moho.

Los morteros deben ser lo suficiente impermeables para evitar la entrada de agua desde el exterior, pero capaces de eliminar el agua de condensación

⁶⁵ Rodríguez Sáiz, A. (2008). Tesis Doctoral. "Fabricación de morteros de albañilería con escoria blanca de horno cuchara y su utilización en construcción."

que se deposita en el interior por causas higrotérmicas (Alejandre Sánchez 2002)⁶⁶ (Rodríguez Sáiz 2008)⁶⁷.

El procedimiento de análisis de la permeabilidad al vapor de agua viene recogida en la Norma UNE-EN 1015-19 (AENOR 1999)⁶⁸, tanto para fuertes como para débiles humedades relativas en los morteros para revoco y enlucido de paramentos.

3.1.7.7. Comportamiento térmico

Esta característica de los morteros viene definida por la cantidad de calor que un paramento revestido con mortero deja pasar por unidad de superficie en la unidad de tiempo.

Esta conductividad depende de varios factores entre los que destaca la densidad, ya que morteros muy densos y cerrados oponen mayor resistencia al paso del calor a través de ellos. Otro factor determinante es el espesor de la capa de mortero, ya que cuanto mayor sea el grosor del revestimiento mayor dificultad tendrá el frío o calor a pasar. Por último, también la porosidad puede influir ya que los morteros con muchos poros abiertos presentan una menor resistencia al paso del calor. No obstante, los morteros con aire ocluido en el interior del mortero se comportan mejor, ya que estos cierran la red capilar impidiendo el paso del calor.

La derogada Norma Básica de Edificación NBE-CT-79 (Ministerio de Fomento 1979)⁶⁹, fija los valores de conductividad térmica en función de la densidad.

⁶⁶ Alejandre Sánchez, F. (2002). Tesis Doctoral. "Historia, caracterización y restauración de morteros". Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción de la Universidad de Sevilla.

⁶⁷ Rodríguez Sáiz, A. (2008). Tesis Doctoral. "Fabricación de morteros de albañilería con escoria blanca de horno cuchara y su utilización en construcción."

⁶⁸ AENOR (1999). UNE-EN 1015-19. "Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros de revoco y enlucido".

⁶⁹ Ministerio de Fomento (1979). NBE-CT-79. Norma Básica. "Condiciones Térmicas". Ministerio de Fomento.

Tipo	Densidad kg/m ³	λ (Kcal/h m °C)	λ (W/ m °C)
Mortero cemento	2000	1,2	1,4
Mortero mixto	1600	0,75	0,87

Tabla 3.5: Comportamiento térmico de los morteros en función a su densidad.

3.1.7.8. Comportamiento ante el fuego

La caracterización del comportamiento de los morteros frente al fuego se determina mediante dos parámetros de referencia: la reacción y la resistencia al fuego.

Un mortero sometido a las altas temperaturas de un incendio soporta unas transformaciones internas que modifican sus características, ya que por encima de 250°C, los morteros experimentan una caída importante de las resistencias mecánicas.

Una forma de evitar estas transformaciones no deseadas es el diseño de morteros refractarios. Estos morteros están fabricados con materiales que soportan bien altas temperaturas, como son las arcillas expandidas o las arenas calizas (Rodríguez Sáiz 2008)⁶⁷.

3.2. MÉTODOS DE ALIGERAMIENTO DE LOS MORTEROS

3.2.1. Introducción

El mortero de albañilería es una de los materiales más habituales y útiles en la construcción de edificios (Hollaway 2003)⁷⁰. El uso de morteros ligeros permite reducir el peso propio de los edificios, ajustando las dimensiones de los elementos estructurales. Por otro parte, suelen presentar unas mejores propiedades de aislamiento térmico (Gutiérrez González, Gadea et al. 2012)⁷¹.

⁷⁰ Hollaway, L. C. (2003). "The evolution of and the way forward for advance polymer composites in the civil infrastructure." *Construction and Building Materials* 17: 365-378.

⁷¹ Gutiérrez González, S., J. Gadea, A. Rodríguez, C. Junco and V. Calderón (2012). "Lightweight plaster materials whit enhanced thermal properties made whit polyurethane foam wastes." *Construction and Building Materials* 28: 653-658.

Los materiales aligerados son aquellos que en su origen tiene densidades normales, pero que con algún procedimiento se les disminuye su densidad. Es habitual añadir a las mezclas componentes de baja densidad como áridos ligeros o aire, convirtiéndolo así en un material celular.

Se denomina “material celular” al que se encuentra constituido por múltiples celdillas de aire o gas en su interior. La palabra célula proviene del latín y significa “pequeño compartimento, espacio cerrado”.

La utilización de materiales aligerados es muy antigua, ya en el siglo II antes de Cristo aparece una primera referencia en la construcción de la bóveda del Panteón de Roma, fabricada con una mezcla de argamasa y piedra pómez.

En general, la conversión de un material sólido en uno celular se realiza mediante la incorporación en el mismo de aditivos espumantes que pueden tener como base una reacción física, química o incluso biológica.

Casi todos los materiales pueden espumarse, aunque los más comunes son los polímeros. En la actualidad, se están investigando nuevas tecnologías que permiten espumar materiales como los metales, la cerámica o el vidrio.

Muchos alimentos también son espumas, como por ejemplo el pan, generalmente formados por espuma de celdas cerrada, expandida por la fermentación de la levadura y por el dióxido de carbono del bicarbonato sódico. El merengue es clara de huevo con azúcar y el chocolate y las golosinas se expanden para hacerlas más atractivas y baratas. También los cereales del desayuno son ejemplos de cómo la generación de vapor crea espumas produciendo nuevas texturas más crujientes.

Los sólidos celulares pueden generarse también por uniones de esferas o granos expandidos, como por ejemplo, las planchas de poliestireno expandido o las espumas metálicas y de vidrio que se fabrican mediante una mezcla de esferas unidas con un ligante de contacto como la resina epoxi. Cada partícula es una pequeña cáscara esférica que está unida a las vecinas por puntos. Por otra parte, los sólidos celulares de menor densidad se pueden generar creando una cadena tejida de fibras.

El objetivo de todos los procesos comentados es generar un nuevo material que, por su configuración (estructura celular), se pueda utilizar como material aislante y de amortiguación de la energía cinética producida por los impactos.

La estructura celular ha fascinado a los naturistas. Así Hooke examinó sus formas, Kelvin analizó su composición y Darwin especuló sobre su origen y funciones.

Las propiedades de los sólidos celulares dependen directamente de la forma y de la estructura de las celdas, de manera que para cada sólido celular será preciso caracterizar el tamaño, forma geométrica y tipología de las celdas, así como la conexión de sus paredes celulares y del espacio poroso (Gibson and Ashby 1999)⁷². El tamaño de las celdas, por ejemplo, no influye en las propiedades térmicas y mecánicas del material. Esta propiedad importa más cuanto más simétricas son las celdas, pero cuando éstas son más alargadas o más anchas, las propiedades dependen de la dirección (Grenestedt 1999)⁷³. También es importante que las celdas sean abiertas o cerradas respecto a las celdas vecinas.

Las formas de fabricación de los materiales celulares son numerosas y variadas, las formas más habituales se recogen en la Tabla 3.6.

FORMAS DE FABRICACIÓN DE MATERIALES CELULARES	
Tipos	Designación
Espumas	Mediante agentes expansivos : polímeros y vidrios
	Inclusión sólidos en estado líquido : espumas metálicas
	Anodización : proceso en sólido para espumas metálicas
	Sintering : proceso en sólido para espumas metálicas
Paneles de abeja	Moldeado
	Extrusión
	Otros

Tabla 3.6: Formas de fabricación de materiales celulares.

⁷² Gibson, L. J. and M. F. Ashby (1999). "Cellular solids: structure and properties". Cambridge University Press: 453-467.

⁷³ Grenestedt, J. L. (1999). "Effective elastic behavior of some models for perfect cellular solids." International Journal of Solids and Structures 36.

3.2.2. Clasificación de los materiales celulares

3.2.2.1. Según su origen

La clasificación de los materiales celulares según su origen se recoge en la Tabla 3.7.

CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES CELULARES SEGÚN SU ORIGEN	
Materiales	Designación
Naturales	Madera - corcho - esponja - coral - huesos
Artificiales	Espumas - Poliuretano - Polietileno - Paneles de abeja - etc.

Tabla 3.7: Clasificación de los materiales celulares según su origen.

3.2.2.2. Según su estructura

La estructura será de celda abierta cuando el material se encuentra contenido en los bordes de las celdas. El sólido consiste en una pared de pequeñas barras similares a vigas. La estructura es de celda cerrada cuando el material está contenido en los bordes y las caras de las celdas, aislando cada celda de las adyacentes.

En la Tabla 3.8 se recoge la clasificación de los materiales celulares según su estructura.

CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES CELULARES SEGÚN SU ESTRUCTURA	
Estructura	Designación
Bidimensionales (Paneles de abeja)	Celda cerrada
	Celda abierta
Tridimensionales (Espumas)	Celda cerrada
	Mixtas

Tabla 3 8: Clasificación de los materiales celulares según su estructura.

3.2.3. Procedimientos para aligerar materiales

Existen muchos procedimientos para aligerar un material, que básicamente consisten en:

3.2.3.1. Realizar huecos o alveolos

Se puede ocluir aire en el interior de un material mediante los siguientes procedimientos:

- a) Incorporación de aditivos: son productos que se adicionan a las pastas, morteros y hormigones en estado fresco, con el objeto de mejorar alguna de sus características. Estos aditivos pueden ser sólidos en forma de polvo o líquidos, recomendándose el empleo de aditivos líquidos, pues se consiguen mayores homogeneidades en las masas.

El uso de aditivos en la fabricación de morteros y hormigones se ha generalizado, debido fundamentalmente, a los avances de la química en la construcción y a la aparición de normativa, considerándose como el cuarto componente de los hormigones.

Los aditivos se podrán utilizar siempre que se justifique que la sustancia agregada, en las proporciones y condiciones previstas, produzca el efecto deseado, sin perturbar excesivamente las restantes características del mortero u hormigón, o no afecte a su durabilidad o a la corrosión de las armaduras.

Salvo en casos especiales, los aditivos no deben superar el 5% del peso del cemento, de acuerdo con lo establecido en la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) en su Artículo 29.2 (Ministerio de Fomento 2008)⁷⁴. Los aditivos recogidos por la citada Instrucción se muestran en la Tabla 3.9, y deben cumplir la Norma UNE-EN 934-2 (AENOR 2010)⁷⁵.

- b) Adición de cargas ligeras: se puede aligerar un material mediante la adición de cargas ligeras, como rellenos o sustitutos de parte de los áridos de la mezcla. Se denomina adición por ser materiales que se incorporan a la masa de los morteros y hormigones, en cantidades

⁷⁴ Ministerio de Fomento (2008). "Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08."

⁷⁵ AENOR (2010). UNE-EN 934-2. "Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para morteros de albañilería. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado".

superiores al 5% del peso del cemento. Estas cargas ligeras suelen denominarse “áridos ligeros”, y pueden ser naturales o artificiales. Pueden emplearse tal y como se encuentran en la naturaleza o bien triturados y elaborados mediante un proceso de fabricación. Un árido se considera ligero según la Norma UNE-EN 13.055-1 (AENOR 2003)⁷⁶, cuando su densidad es inferior a 2000 Kg/m³.

TIPOS DE ADITIVOS SEGÚN EHE-08	
Tipo de aditivo	Función principal
Reductores de agua/ Plastificantes	Disminuir el contenido de agua de un hormigón para una misma trabajabilidad o aumentar esta sin modificar el contenido de agua.
Reductores de agua/ Superplastificantes	Disminuir significativamente el contenido de agua de un hormigón sin modificar la trabajabilidad o aumentar significativamente la trabajabilidad sin modificar el contenido de agua.
Modificadores del fraguado/ Aceleradores retardadores	Modificar el tiempo de fraguado de un hormigón.
Inclusores de aire	Producir en el hormigón un volumen controlado de finas burbujas de aire, uniformemente repartidas, para mejorar su comportamiento frente a las heladas.
Multifuncionales	Modificar más de una de las funciones principales definidas con anterioridad.

Tabla 3.9: Tipos de aditivos según EHE-08. Artículo 29.2.

Las ventajas de su adición son la mejora de la granulometría, haciendo las masas más trabajables y, en general, también de mayor resistencia mecánica y dureza superficial. Además, también mejora las características térmicas y acústicas.

Dado que en esta Tesis Doctoral se van a diseñar y caracterizar morteros aligerados, en los siguientes apartados se analizarán con mayor profundidad sus propiedades.

⁷⁶ AENOR (2003). UNE-EN 13.055-1. “Áridos ligeros. Parte 1: Áridos ligeros para hormigón, mortero e inyectado”.

3.2.4. Procedimientos de aligeramiento de morteros

El uso de materias primas inertes de diferentes densidades para la elaboración de morteros, es conocido desde la época de los romanos y griegos (Cowan 1977)⁷⁷. Sin embargo, el empleo generalizado de áridos ligeros se produce a partir de principios del siglo XX cuando Stephen Hayde descubre un material ligero con suficiente dureza y calidad para ser empleado en hormigones estructurales (Buildex Inc. 2012)⁷⁸. A partir de 1950 comienza la comercialización generalizada de este tipo de materiales. En la actualidad, las investigaciones para el desarrollo de materiales aligerados se orientan a los rellenos de baja densidad geotécnica y a su uso como medio de filtración biológica (Draganovic and Stille 2.011)⁷⁹.

A continuación se comentan algunos procedimientos seguidos para aligerar un mortero.

3.2.4.1. Incorporación de aditivos

Vamos a centrar el estudio en los aditivos que modifican el contenido de aire (o de otros gases) de los hormigones y morteros. Ya hemos visto, como su función principal es modificar, en uno u otro sentido, el contenido de aire ocluido en los morteros y hormigones.

Dentro de éstos podemos distinguir:

- a) **Inclusores de aire o aireantes:** son aditivos cuya función principal es producir en los hormigones o morteros un número elevado de finas burbujas de aire (de 10 a 500 micras de diámetro, las mejores son las de 100 micras), de distribución continua de tamaños, separadas y repetidas uniformemente. Estas microburbujas interrumpen la red capilar, aumentando la resistencia a las heladas al actuar como

⁷⁷ Cowan, H. J. (1977). "History of masonry and concrete domes in building construction." *Build Environ* 12: 1-24.

⁷⁸ Buildex Inc. (2012). "Haydite -Shale Lightweight Aggregate."

⁷⁹ Draganovic, A. and H. Stille (2.011). "Filtration and penetrability of cement-based grout. Study performed whit a short slot". *Tunneling Underground Space Technology* 26(4): 548-559.

recintos de expansión. Debido a su forma esférica actúan como lubricante del hormigón fresco, dando lugar a una mejora de la docilidad y una disminución de la tendencia a la segregación y exudación.

- b) Espumantes: son aditivos cuya función es generar espuma mediante batido natural o mecánico. Su función principal es la oclusión de pequeñas burbujas de aire distribuidas homogéneamente, dotándole al material de una estructura alveolar y consiguiendo disminuciones de peso de hasta cuatro o cinco veces el peso inicial. Con los espumantes se consiguen morteros y hormigones celulares.

Como funciones secundarias destacan la facilidad de puesta en obra de los morteros dosificados con estos aditivos al aumentar la docilidad de las mezclas y reducir su peso. También mejora el aislamiento térmico

Por otro lado, poseen efectos negativos en la masa, como la disminución de las resistencias mecánicas y, sobre todo, la dureza superficial.

Sus aplicaciones están en el moldeo de rellenos de gran volumen, formación de pendientes de azoteas y tejados o en la prefabricación de bloques de hormigón celular, piezas especiales, bovedillas y paneles de cerramiento.

- c) Generadores de gas: son aditivos cuya función es producir una gas por medio de una reacción química durante la colocación del hormigón o motero. Dosificados en pequeñas cantidades producen una ligera expansión del hormigón o mortero cuando se encuentran en estado fresco, reduciéndose este efecto después de la colocación. Con cantidades más elevadas de aditivo se produce un volumen importante de gas, dando lugar también a hormigones y morteros celulares.

3.2.4.2. Adición de cargas ligeras

Ya se ha comentado cómo se puede aligerar un material mediante la adición de cargas ligeras o la sustitución de parte de los áridos de la mezcla.

El término adición indica que el material añadido se incorpora a la mezclas en cantidades superiores al 5% del peso del conglomerante.

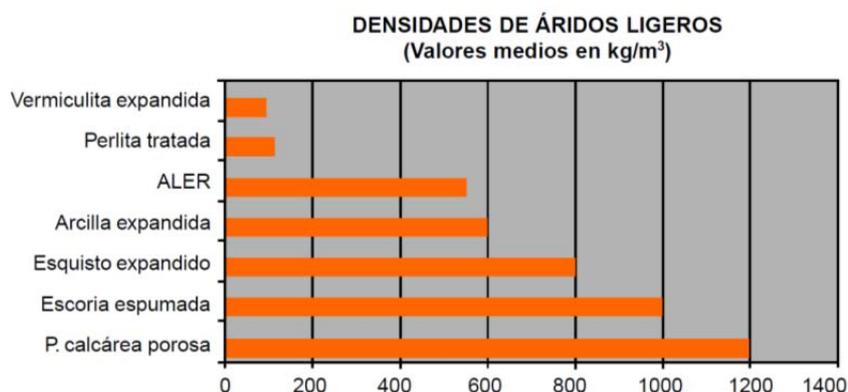
Las ventajas que aportan su adición son la mejora de la granulometría, aumentando la trabajabilidad de las mezclas y, en general, consiguiendo mayores resistencias mecánicas y dureza superficial. De igual forma, también se mejoran las propiedades térmicas y acústicas.

Estos áridos pueden ser naturales o artificiales y pueden emplearse tal y como se encuentran en la naturaleza o triturados y elaborados mediante un proceso de fabricación. La clasificación de estas adiciones es la siguiente:

- a) Naturales inorgánicas no elaboradas: proceden de la desintegración natural o artificial de las rocas debido a fenómenos erosivos. Ejemplos de estos materiales son las diatomeas, las conchas machacadas o la piedra pómez.
- b) Naturales inorgánicos elaborados: se obtienen a partir de un proceso industrial, de estructura porosa cerrada o abierta formada por los gases producidos por la materia orgánica incinerada o la evaporación del agua de cristalización durante el proceso de fabricación. Algunos ejemplos son las arcillas expandidas, la perlita expandida o la vermiculita.
- c) Naturales orgánicos no elaborados: como ejemplo de éstos tenemos los granulados de corcho, cáscaras de cereales o las virutas de madera.
- d) Industriales no elaborados: su utilización es cada día más importante por suponer el reciclaje de desechos de la industria. Ejemplos de éstos son las escorias o las cenizas volantes.
- e) Industriales elaborados: como por ejemplo la escoria expandida, espuma de escoria, las cenizas expandidas y las cenizas sintetizadas.
- f) Orgánicos: como partículas de plástico o de poliestireno expandido.

En los últimos años se está implantando la utilización de materiales sostenibles, como son el granulado de corcho, cáscara de cereal o las virutas de madera (Gouny, Fouchal et al. 2012)⁸⁰.

La Gráfica 3.1 representa las densidades de diferentes tipos de áridos ligeros.



Gráfica 3.1: Densidad de áridos ligeros. Fuente: Revista de la Bolsa Nacional de Residuos y Subproductos Industriales de Colombia. Marzo 2001. (Elias Castells 2001)⁸¹.

3.2.5. Morteros aligerados con agregados ligeros

3.2.5.1. Perlita expandida

La perlita es un silicato de origen volcánico que contiene agua de cristalización en su molécula. Este mineral, debidamente triturado a una granulometría preestablecida, se lleva a fusión sobre los 1000-1300°C en hornos especiales. A dicha temperatura, el agua ocluida se transforma en vapor y obra como factor de expansión, hasta construir un gránulo ligero, formado por microceldas cerradas, con un volumen hasta veinte veces superior al inicial.

⁸⁰ Gouny, F., F. Fouchal, P. Maillard and S. Rossignol (2012). "A geopolymer mortar for wood and earth structures." *Construction and Building Materials* 36: 188-195.

⁸¹ Elias Castells, X. (2001). "Árido ligero expandido a base de residuos. Aspectos Técnicos Económicos." *Revista de la Bolsa Nacional de Residuos y Subproductos Industriales de Colombia*.



Figura 3.1: Perlita expandida.

Esta expansión se debe a la presencia de un 2% a un 6% de agua en la roca de perlita en estado natural. Cuando se calienta con rapidez por encima de 1000°C, la roca estalla a medida que el agua combinada se evapora y se crea un número incontable de diminutas burbujas que le confieren su ligereza, y su color blanco.

De ello resulta un material excelente para ser empleado como aislamiento térmico y acústico, utilizado en el relleno de paredes dobles o en mezcla con cementos, yesos o escayolas (Lanzón and García Ruiz 2008)⁸².

3.2.5.2. Vermiculita

La vermiculita es un mineral de la familia de la mica, compuesto básicamente por silicatos de aluminio, hierro y magnesio. Con un tratamiento controlado, a temperaturas del orden de 700°C, el mineral se expande, exfoliándose y aumentando su volumen inicial de 20 a 30 veces.

En este proceso térmico se producen en el interior del material, entre sus paredes, una gran cantidad de células microscópicas cerradas, conteniendo aire móvil y deshidratado.

⁸² Lanzón, M. and P. A. García Ruiz (2008). "Lightweight cement mortars: Advantages and inconveniences of expanded perlite and its influence on fresh and hardened state and durability." *Construction and Building Materials* 22(8): 1798-1806.



Figura 3.2: Vermiculita expandida.

Las láminas formadas actúan como diminutos espejos que reflejan las radiaciones térmicas como sonoras, lo que confiere a los morteros con ellos ejecutados propiedades acústicas y capacidad de aislamiento térmico (Formosa, Haurie et al. 2008)⁸³.

Actualmente se están desarrollando nuevas técnicas de mezclado de mortero y vermiculita que, junto a nuevos aditivos como el ácido cítrico, el ácido tartárico, el sulfato de cobre o el citrato de potásico o sódico proporcionan unas características de resistencia, dureza y aislamiento mejoradas (Roman Alema and Torres Zacarías 2010)⁸⁴.

3.2.5.3. Corcho natural

El corcho es un producto natural, no contaminante, de fácil combustión, estable a efectos dimensionales e imputrescibles. Posee una densidad baja debido a su estructura celular, que se encuentra rellena de aire, y al material que une las celdas. Presenta también una baja conductividad térmica, una buena absorción acústica y una alta impermeabilidad (Gibson and Ashby 1999)⁸⁵.

⁸³ Formosa, J., L. Haurie, J. M. Chimeneos, A. M. Lacasta and J. R. Rosell (2008). "Comparative study of magnesium by products and vermiculite formulations to obtain fire resistant mortars." *Materials Scientific Forum* (sium): 588-588, 898-902.

⁸⁴ Román Alema, B. and P. Torres Zacarías (2010). "Mortero de yeso con vermiculita expandida, aditivado y procedimiento para su obtención. ES2331043B1.

⁸⁵ Gibson, L. J. and M. F. Ashby (1999). "Cellular solids. Structure and properties." Cambridge University Press.

Existen estudios recientes que estudian el impacto del corcho utilizado como sustituto de la arena, en los que se evalúa que influencia tienen la humedad del corcho, su tamaño del grano y la edad sobre las propiedades mecánicas (Novoa, Ribeiro et al. 2004)⁸⁶.

Otros estudios evalúan la disminución del peso de los paneles prefabricados para particiones y trasdosados de base de escayola mezclados con corcho, y la mejora de la capacidad de deformación y del aislamiento acústico que se obtienen (Rio Merino 2005)⁸⁷.



Figura 3.3: Aplicación de mortero de corcho. Fuente: www.cannabric.com.

Existen estudios donde se determinan las variaciones en las propiedades físicas y mecánicas de un hormigón dosificado con polvo de corcho, concluyendo que la resistencia mecánica resultante es muy baja (a los 43 días se llega a los 4,3 MPa) y se produce un retraso en endurecimiento debido a la gran cantidad de agua en la masa (González, Llamas et al. 2007)⁸⁸.

⁸⁶ Novoa, P. J., M. C. Ribeiro, A. J. Ferreira and A. T. Marques (2004). "Mechanical characterization of lightweight polymer mortar modified whit cork granulates." *Compos Sci Technology* 64: 2197-2205.

⁸⁷ Rio Merino, M. (2005). "Nuevas aplicaciones del corcho en el campo de la edificación". Tercer encuentro Eurocork. Huelva.

⁸⁸ González, B., B. Llamas, A. Juan and I. Guerra (2007). "Ensayo de hormigones fabricados con polvo de corcho." *Materiales de Construcción* 57(286): 83-90.

3.2.5.4. Arcilla expandida

Los morteros diseñados en esta Tesis Doctoral se han aligerado dosificando arcilla expandida, por lo que esta adición se estudiará con mayor profundidad en apartados posteriores.

3.2.5.5. Poliestireno expandido (EPS)

Es un material plástico que se utiliza en la fabricación de diferentes materiales pero que, por sus características físicas y químicas, permanece inalterable frente al paso del tiempo y no se descompone, lo que resulta un problema cuando se convierte en residuo.

La base del poliestireno es el estireno, un líquido cuyas moléculas se polimerizan, dando origen a las macromoléculas e poliestireno. Cuando se mezcla con agua y un agente de expansión (hidrocarburo pentano C_5H_{12}), da lugar a la formación del poliestireno expansible.



Figura 3.4: Morteros aligerados con EPS.

Los estudios sobre la utilización de agregados a base de EPS son recientes y datan de los últimos 10 años. Hay trabajos que analizan el comportamiento de las mezclas que contienen humo de sílice como material complementario al cemento (Babu and Babu 2003)⁸⁹, otros valoran el comportamiento térmico y acústico de este material (Peng, Chen et al. 2002)⁹⁰

⁸⁹ Babu, K. G. and D. S. Babu (2003). "Behavior of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume." *Cement and Concrete Research* 33(5): 755-762.

⁹⁰ Peng, J. H., M. F. Chen and J. X. Zhang (2002). "Study on waste expanded polystyrene as lightweight aggregate for thermal insulating mortar." *Jianzhu Cailiao Xuebao/J Build Mater* 166.

y los más recientes estudian su durabilidad frente al taque de productos químicos y ataques biológicos (Wang and Meyer 2012)⁹¹.

3.2.5.6. Cascotes de ladrillo

Como su nombre indica, es ladrillo triturado. Su composición es un 80% de arcilla, con el agregado del material ligante. La arcilla cocida está compuesta por un 45% a un 70% de sílice, de un 10% a un 40% de alúmina y entre un 10% a un 20% de agua.

El material procede de los hornos de ladrillos, residuos de fabricación de baldosas o recuperación de escombros, que previa limpieza de impurezas, trituración y cribado pueden ser usados como agregados.

Para su uso como elementos agregados al mortero, deberán ser triturados, cribados y clasificados de acuerdo al tamaño de los granos. Se aconseja eliminar los de dimensiones inferiores a 3 mm, ya que son los que contienen una mayor cantidad de impurezas nocivas. Si se desean agregados más finos se debe retriturar y cribar los granos mayores.

Las principales propiedades de los agregados de residuos de ladrillo se recogen en la Tabla 3.10.

PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS DE RESIDUOS DE LADRILLO	
Propiedades	Parámetros
Porosidad	Depende de las tierras utilizadas y del proceso de la materia prima
Peso específico	1700 a 2000 Kg/cm ³ , menor que los componentes normales de morteros y hormigones, pero mayor al de otros agregados livianos, por lo aumenta la densidad.
Resistencia	Resistencia a compresión entre a 100 a 300 Kg/cm ²
Geometría	Presentan superficies ásperas y rugosas. Su color depende de sus materiales primas de su elaboración
Absorción	Son muy absorbentes

Tabla 3.10: Propiedades de los agregados de residuos de ladrillo.

⁹¹ Wang, R. and C. Meyer (2012). "Performance of cement mortar made with recycled high impact polystyrene." *Cement and Concrete Compos* 34(9): 975-981

3.3. ARCILLA EXPANDIDA

3.3.1. Introducción

Los primeros hormigones ligeros se ejecutaron para construir edificaciones durante el Imperio Romano en los años 20 a.C. Consistían en la mezcla de cementos puzolánicos con materiales de baja densidad, como la piedra pómez. Entre las obras realizadas con este tipo de hormigón destacan La Cúpula del Panteón de Agripa (25 a.C.), los arcos del Coliseo Romano (70 d.C.), con luces superiores a 25 m (Arce Pezo 1997; Galli Agustina 2007)^{92 93}.

Con los avances de la tecnología se experimentaron con nuevos agregados ligeros con las arcillas, pizarras y escorias expandidas. También se han ensayado con elementos plásticos como el poliestireno y agregados ricos en sílice como la cascarilla de arroz (Hou Huang, Caicedo Chica et al. 2009)⁹⁴.

Los primeros edificios construidos con hormigones estructurales ligeros se ejecutaron después de la Primera Guerra Mundial. Destacan las obras de ampliación del Gimnasio de la Escuela de Deportes Acuáticos de Kansas, donde se utilizó para disminuir el peso propio de la estructura, dada la escasa capacidad portante del suelo (Clay and Slate Institute 1971)⁹⁵.

La compañía Haydite en Kansas fue la primera que obtuvo una patente para la fabricación de pizarra expandida, suministrando el material en 1925, para la ampliación del número de plantas de un edificio de oficinas de la compañía de teléfonos South Western Bell, que originalmente constaba de 14 plantas. Se realizaron estudios para determinar el número de plantas que se podían incrementar, utilizando hormigones aligerados con arcillas expandidas en vez de hormigones tradicionales, determinado que se podían añadir 14

⁹² Arce Pezo, X. (1997). "Hormigones Livianos". Escuela Superior del Litoral.

⁹³ Galli Agustina, P. (2007). "Las inmigraciones italianas y su aporte técnico ornamental a la arquitectura y urbanismo", Universidad de Belgrado.

⁹⁴ Hou Huang, D. E., J. L. Caicedo Chica and A. A. Falconi Pinacay (2009). "Hormigones Livianos de alto desempeño." Revista Tecnológica ESPOL.

⁹⁵ Clay and Slate Institute (1971). "Light weight concrete".

plantas más, en vez las 8 que se podían adicionar si se utilizaba hormigón convencional.

Sin embargo, las propiedades aislantes de estos áridos ligeros no se empezaron aprovechar hasta 1923, año en el que se fabricó el primer bloque de hormigón ligero; desde entonces se han multiplicado los usos aislantes de los hormigones ligeros, hasta llegar a las aplicaciones de hoy en día de formación de pendientes y aislamiento de cubiertas, la rehabilitación de forjados antiguos o los recrecidos aislantes; y a estas se les han unido otras, como las bovedillas, los casetones ligeros, los morteros refractarios, etc..

La arcilla expandida es un producto químicamente neutro, que no desprende gases ni malos olores, es imputrescente y no atacable por parásitos, hongos o roedores. No le afectan las sustancias químicas y es altamente resistente a las heladas y a los cambios de temperatura, con lo que tenemos un material bastante inalterable en el tiempo.

Sus cualidades le permiten un amplio número de utilizaciones para la construcción como:

- Aislamiento de cubiertas, forjados, soleras.
- Prefabricados ligeros aislantes: bloques, bovedillas, casetones, placas de cubierta, paneles de cerramiento.

Por otro lado, sus características le hacen un producto altamente útil para cultivos.

3.3.2. Proceso de producción

Corresponden a una clase especial de arcilla en estado natural, ya que todas las arcillas comunes no expanden, extraída de canteras a cielo abierto que presentan una aptitud a la expansión de forma natural cuando se lleva el material granulado a elevadas temperaturas en hornos rotatorios (entre 1100°C y 1300°C), caracterizándose porque expande, debido a los gases de combustión internos, entre un 20% y un 400% veces su tamaño inicial, dependiendo si el material fue mezclado con o sin adiciones.

Los hornos rotatorios son los más adecuados para la obtención de esas elevadas temperaturas, dado que la expansión y las densidades resultantes dependen del proceso de quema (Roberto Martínez 2010)⁹⁶. Estos hornos consisten en un cilindro alineado con ladrillos refractarios y con la capacidad para rotar alrededor de su eje longitudinal, el cual está inclinado a un ángulo de 5° con respecto a la horizontal. La longitud del horno está entre los 30 y 60 metros y depende de la composición del material grueso que es procesado.

El material preparado es depositado dentro del horno, mientras el quemado toma lugar en la parte más baja final. Como el material se mueve a la zona de calor, la temperatura de las partículas se incrementa gradualmente y se produce la expansión. El material posteriormente se descarga en un enfriador rotatorio, donde el agregado es enfriado por la entrada de aire frío.



Figura 3.5: Horno rotario y arcilla expandida recién salida horno.

De acuerdo al tipo de horno rotatorio utilizado, se pueden identificar los siguientes procedimientos (Parra Henao 2000; Chandra and Berntsson 2002)^{97 98}:

⁹⁶ Roberto Martínez, D. (2010). Concreto Liviano estructural con arcilla expandida termicamente extraída de canteras localizadas en el sur de la sabana de bogota. Universidad Nacional de Colombia.

⁹⁷ Parra Henao, D. L. (2000). "Estudio preliminar de expansión térmica de arcillas a escala de laboratorio." Universidad Nacional de Colombia –Sede Medellín-. Facultad Nacional de Minas.

- a) Procedimiento Seco: la arcilla inicialmente tiene un 20% de humedad y posteriormente se seca hasta alcanzar entre un 7-10%. A continuación se pulveriza, se precalienta, se granula por tamizado y se envía al horno rotatorio. El tamaño del material dependen de la finura de la molienda.
- b) Proceso semihúmedo: a la materia prima se le añaden agentes que favorecen la expansión y homogenización. La pasta inicialmente se pasa por una criba con perforaciones circulares, originando unos cilindros de unos 10-12 mm de largo, y se traslada a un canal o tambor de secado. Al poderse controlar el tamaño de los agregados, este método de fabricación es el más utilizado.

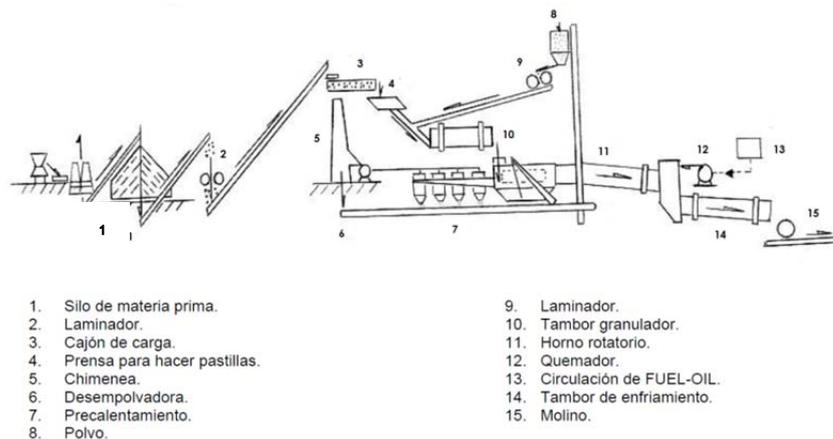


Figura 3 6: Proceso semihúmedo de fabricación de arcilla expandida.

- c) Proceso húmedo: es el más utilizado para la fabricación de las arcillas expandidas. La materia prima se introduce con una humedad aproximada de un 25% en forma de finas láminas en un horno de secado para formar gránulos de arcilla, evaporar el contenido de agua y precalentar el material antes de pasar al horno de quema. El producto final es una arcilla expandida sellada tanto por fuera como

⁹⁸ Chandra, S. and L. Berntsson (2002). "Lightweight Aggregate Concrete: Science, Technology, and Applications." Chalmers University of Technology de Suecia. Noyes Publications. Norwich, New York, U.S.A.

por el interior, presentando hoyos de diferentes tamaños que se encuentran generalmente interconectados.

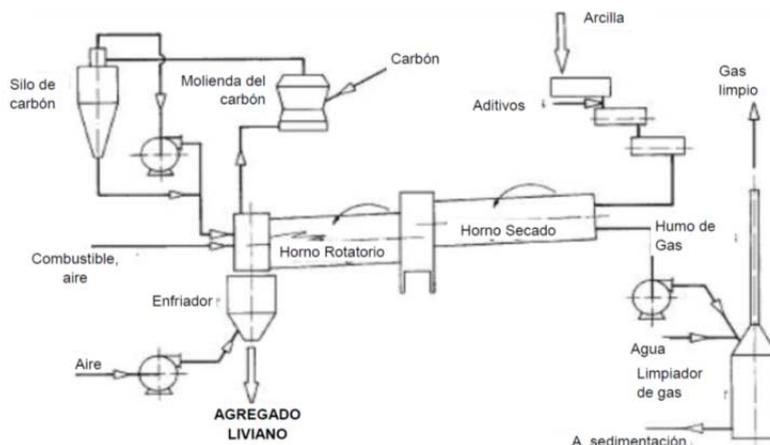


Figura 3.7: Proceso húmedo de fabricación de arcilla expandida.

3.3.3. Propiedades

Las Arcillas Expandidas Térmicamente (AET) se caracterizan por ser esferas o partículas irregulares con un recubrimiento exterior sinterizado, brillante en ocasiones, con una superficie externa cerrada, poco porosa y de preferencia vitrificada. En contraste, el interior del árido presenta un color negro calcinado y una gran porosidad, que es la responsable del carácter liviano del agregado.



Figura 3.8: Granulo Aliven (izqu.), granulo Leca (centro), granulo Arlita (drcha.).

Generalmente un producto expandido, sea de arcilla, limo, arcilla esquistosa o esquisto arcilloso tiene dos denominaciones de acuerdo a la forma. La primera corresponde al “granulado de arcilla expandida”, que son los granos aproximadamente esféricos de forma redondeada o con aristas

suaves, mientras que los irregulares, con ángulos y aristas agudos, corresponden a los denominados "ripios de arcilla expandida".

Las Arcillas Expandidas Térmicamente se diferencian de los agregados de peso normal por presentar un menor peso unitario en comparación con estos. Como características destacan:

- a) Densidad: es la propiedad que más la diferencia de los agregados naturales (entre 1440 y 1760 kg/m³), mientras que la arcilla expandida a varía entre 300 kg/m³ en la arcilla expandida más ligera y 1120 kg/m³ en la arcilla con un grado muy incipiente de expansión (Portland Cement Association 1968)⁹⁹.
- b) Resistencia a compresión: se puede determinar de varias formas, bien por rotura individual, por compresión lenta a una carga determinada, o por ensayo comparativo de dos hormigones, uno de ellos con arcilla expandida y otro normal (Virella 1976)¹⁰⁰. La resistencia del árido ligero está relacionada con la densidad y a la forma del grano, la cual debe ser lo más esférica posible (Weiger and Karl 1974)¹⁰¹.
- c) Absorción: los agregados livianos suelen presentar una alta absorción, entre el 5% al 15% de agua por peso de material seco, valor que aumenta a un 20% para áridos con densidades por debajo de 600 Kg/m³. En este trabajo se han utilizado arcillas expandidas con absorciones entre el 23% al 27%.
- d) Aislamiento térmico y acústico: la estructura reticular de la arcilla expandida conforma multitud de cámaras microscópicas de aire que le confieren su capacidad aislante, con conductividades térmicas de 0,11 W/m°C. La arcilla expandida es un magnífico aislante acústico, sobre todo ante ruidos de impacto que se propagan por vibraciones de baja

⁹⁹ Portland Cement Association (1968). "Structural Lightweight Concrete. Design and Control of Concrete Mixtures".

¹⁰⁰ Virella, A. (1976). "Áridos de arcilla expandida." Sección Hormigón Número 503.

¹⁰¹ Weiger, H. and S. Karl (1974). "Hormigones Livianos Armados".

frecuencia. La estructura porosa del material amortigua las vibraciones, disipando la energía acústica (Martin 2003)¹⁰².

- e) Resistencia al fuego: la arcilla expandida es un material cerámico refractario que tiene su punto de fusión a los 1200°C y la nula existencia de materia orgánica en su composición, ya que se volatiliza durante su proceso de fabricación y anula la emisión de gases tóxicos a altas temperaturas. La arcilla expandida es completamente inerte, estable a los ataques químicos y resistente a las heladas (Martin 2003)¹⁰².

3.4. ÁRIDOS RECICLADOS

3.4.1. Introducción

Existe un referente histórico del uso de Residuos de Construcción y Demolición (RCD). Se trata de la mezcla usada en construcción desde mediados del siglo I a.C. que los romanos denominaron "*opus signium*", que consiste en una especie de hormigón compuesto por cal, arena, puzolana y ladrillo picado o polvo de ladrillo, que además de su dura consistencia, resulta impermeable. Sin embargo, el uso de RDC se relaciona con el fin de la Segunda Guerra Mundial cuando países como Alemania y Reino Unido empiezan su reconstrucción (Nixon P.J. 1978)¹⁰³.

Se entiende por árido reciclado aquel que se obtiene del procesamiento de materiales inorgánicos utilizados previamente en la construcción o que hayan culminado su vida útil. Las materias primas utilizadas para su obtención son pues, los materiales pétreos generados como residuos durante los procesos de construcción y demolición.

Los áridos reciclados de RDC constituyen en cualquier núcleo urbano de cierta importancia una fuente inagotable de áridos, tanto para su empleo

¹⁰² Martin, I. (2003). "Características Técnicas y aplicaciones con hormigón liviano." Hormigón y acero: 228-229.

¹⁰³ Nixon P.J. (1978). "Recycled Concrete as an Aggregate for Concrete." Materiales y Construcción 11: 371-378.

directo, como por ejemplo como material de relleno, como para su uso como áridos de machaqueo en numerosas aplicaciones : hormigón, carreteras, etc.. (Bustillo 2010)¹⁰⁴.

Las primeras investigaciones sobre el uso de áridos reciclados fueron iniciadas en Rusia (Glushge 1946)¹⁰⁵ en las que se establecía que el árido reciclado tiene una menor densidad que el árido natural y que los hormigones realizados con áridos reciclados presentan menores resistencias mecánicas a compresión. Posteriormente se investiga sobre el efecto que tienen los elementos contaminantes en los áridos reciclados (Newman 1946)¹⁰⁶, siendo en Alemania donde se determina la influencia que el yeso genera sobre el hormigón (Graf 1948)¹⁰⁷.

En la década de 1970 varias investigaciones estudian los procesos de trituración de los RCD, diseños de mezcla, propiedades mecánicas y durabilidad del hormigón con áridos reciclados. Su resistencia se mejora bajando la relación agua/cemento, añadiendo más conglomerante o con el uso de adiciones minerales (Buck A.D. 1977)¹⁰⁸. La trabajabilidad de las mezclas disminuye cuando se utiliza árido grueso y fino, pudiendo ser atenuado por el uso de aditivos, ya que el árido fino incrementa la demanda de agua. Propiedades como la adherencia de las pasta de cementos sobre los áridos reciclados y el módulo de elasticidad, disminuyen a media que se incorporan en mayor porcentaje los áridos reciclados en el hormigón (Frondistou-Yannas 1977)¹⁰⁹, mientras que la retracción por secado aumenta

¹⁰⁴ Bustillo, M. (2010). "Manual de RCD y áridos reciclados", Fueyo Editores

¹⁰⁵ Glushge, P. (1946). "Gidrotskhnicheskoge Stroitelstvo." The work of the Scientific Research Institute. Research Institute 4: 27-28.

¹⁰⁶ Newman, A. J. (1946). "The utilization of brick rubble from demolished shelters as aggregate for concrete." Institute for Municipal Engineering 72(2): 113-121.

¹⁰⁷ Graf, O. (1948). "Uber Ziegelsplittbeton, Sandteinbeton und Trummerschuttbeton". Die Bauwirtschaft 2-4.

¹⁰⁸ Buck A.D. (1977). "Recycled Concrete as Source of Aggregate". Journal of American Concrete Institute 74(5): 212-219.

¹⁰⁹ Frondistou-Yannas, S. (1977). "Waste concrete as aggregate for a new concrete". J Am Concrete Institute 74(8): 373-376.

(Nixon P.J. 1978)¹¹⁰. Respecto a la durabilidad frente al hielo-deshielo se determina que es muy similar a la presentada por hormigones fabricados con áridos naturales (Buck 1973; Malhorta 1976)^{111 112}.

La directiva 2008/98/CE, en su Artículo 6, establece las condiciones y requisitos bajo los cuales un residuo deja de serlo para convertirse en un producto para su uso en finalidades específicas. También cuando existe un mercado o demanda para dicha sustancia u objeto, cuando satisface los requisitos técnicos para las finalidades específicas y cumple la legislación existente y las normas aplicables a productos, o bien cuando su uso no genera impactos adversos globales para el medio ambiente o la salud.

Por ello, los áridos reciclados deben cumplir con la normativa técnica para los áridos y demostrar su adecuación al uso. El Reglamento 305/2011 por el que se establecen las condiciones armonizadas para la comercialización de productos de construcción, que sustituye a la derogada Directiva 89/106/CEE, establece las prestaciones que debe tener un producto. El marcado CE indica que indica que dicho producto cumple unas prestaciones y es adecuado para los usos declarados.

Los áridos reciclados procedentes de RCD son productos que resultan de un proceso de reciclaje y deben cumplir los requisitos de los áridos y por lo tanto, sería aconsejable dispusiesen de marcado CE.

3.4.2. Clasificación del árido reciclado en función a su composición

La clasificación de los áridos reciclados se determina en función de su composición, dado que representa un parámetro decisivo a la hora de

¹¹⁰ Nixon P.J. (1978). "Recycled Concrete as an Aggregate for Concrete." *Materiales y Construcción* 11: 371-378

¹¹¹ Buck, A. D. (1973). "Recycled concrete." *Highway Research Record*.

¹¹² Malhorta, V. (1976). "Use of Recycled concrete as a new Aggregate." *Canadian Center of Mineral an Energy Technology*.

establecer la calidad de los mismos (Angulo and Mueller 2009)¹¹³, influyendo en el hormigón o mortero que se elabore con ellos.

Los métodos de clasificación del árido reciclado en función a su composición se han incorporado recientemente a los estudios experimentales, por lo que se disponen de pocos estudios y resultados. La mayoría de ellos (Benito, Cladera et al. 2011; González Fonteboa, Martínez Abella et al. 2011)¹¹⁴ ¹¹⁵ realizan la clasificación según la Norma UNE-EN 933-11 (AENOR 2009)¹¹⁶, mientras que los estudios anteriores lo hacen clasificando de “*visu*” (Poon, Kou et al. 2002)¹¹⁷, o bien mediante ensayos petrográficos para obtener su composición mineralógica (Calvo Pérez, Parra y Alfaro et al. 2002)¹¹⁸.

Los distintos componentes de los áridos reciclados pueden ocasionar problemas en la elaboración de morteros u hormigones. Así, por ejemplo, el material cerámico presente en áridos reciclados afecta negativamente a su comportamiento físico y mecánico (Yang, Qiang et al. 2011)¹¹⁹. Por otra parte, la presencia de “impropios” (componentes minoritarios perjudiciales), como el yeso, asfalto o vidrio, resultan altamente nocivos para morteros y hormigones

¹¹³ Angulo, S. C. and A. Mueller (2009). "Determination of construction and demolition recycled aggregates composition, in considering their heterogeneity". *Materials and Structures* 42(6): 739-748.

¹¹⁴ Benito, M., A. Cladera, T. Del Olmo and F. Pitarch (2011). "Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use". *Construction and Building Materials* 27(1): 612-622.

¹¹⁵ González Fonteboa, B., F. Martínez Abella, D. Carro López and S. Seara Paz (2011). "Stress-strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate". *Construction and Building Materials* 25(5): 2335-2342.

¹¹⁶ AENOR (2009). UNE-EN 933-11." Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos".

¹¹⁷ Poon, C. S., S. C. Kou, et al. (2002). "Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks." *Construction and Building Materials* 16(5): 281-289

¹¹⁸ Calvo Pérez, B., J. L. Parra y Alfaro, B. Astudillo Matilla, C. M. Sanabria Zapata and R. Carretón Moreno (2002). "Áridos reciclados para hormigones y morteros. Caracterización mineralógica y química".

¹¹⁹ Yang, J., D. Qiang and B. Yiwang (2011). "Concrete whit recycled concrete aggregate and crushed clay bricks". *Construction and Building Materials* 25: 1935-1975.

en estado fresco y endurecido, y son producto de la inadecuada selección en origen de los residuos y de la falta de limpieza.

También se ha estudiado cómo afectan las impurezas metálicas en el árido reciclado, aunque los documentos técnicos y artículos consultados no contemplan éstas de forma individualizada, sino conjuntamente con otros metales de naturaleza férrica o no férrica, vidrio, materiales cohesivos, etc. Su contenido puede establecerse entre el 0,5% y el 3%. Sí existen estudios sobre la degradación de las propiedades mecánicas y la durabilidad que producen las impurezas de aluminio en los áridos reciclados con contenidos inferiores al 0,1%, debido a la reacción química entre el aluminio y los álcalis del hormigón, que forman hidrógeno gaseoso que puede llegar a producir la rotura del hormigón endurecido (Wonjum and Takafumi 2013)¹²⁰.

De la bibliografía estudiada puede deducirse que tomando como referencia la composición que presentan los áridos reciclados, resultarían tres categorías dependiendo de la presencia de hormigón y/o materiales cerámicos triturados:

- a) Categoría ARH: áridos reciclados procedentes de hormigón.
- b) Categoría ARC: áridos reciclados procedentes de materiales cerámicos.
- c) Categoría ARM: áridos reciclados mixtos.

La mayoría de los áridos reciclados producidos en España son de carácter mixto, en los que predominan el hormigón o el material de albañilería. Los ARH representan menos del 15% de la producción.

En la Tabla 3.11, se muestra en resumen la clasificación de los áridos reciclados basada en su composición, según las normas y guías de recomendación consultadas.

¹²⁰ Wonjum, p. and N. Takafumi (2013). "Influence of metal impurity on recycled aggregate concrete and inspection method for aluminum impurity". *Construction and Building Materials* 40: 1174-1183.

CLASIFICACIÓN DE LOS ÁRIDOS SEGÚN SU COMPOSICIÓN							
País	Norma	Tipo	Clase	Hormigón %	Cerámico %	M.orgá. %	Impu. %
Alemania	DIN 4226-100	Type 1	ARH	> 90	<10	-	1*
		Type 2	ARH	>70	<30	-	1*
		Type 3	ARC	<20	>80	-	1*
		Type 4	ARM	>80**			1*
Australia	CSIRO	Clase 1ª	ARH	<100	-	-	1
		Clase 1B	ARM	<70	<30	-	2
Bélgica	PPTV 406	Béton	ARH	> 90	<10	0,5	0,5
		Maçonerie	ARC	<40	>60	0,5	1***
		Mixtes	ARM	>40	>10	0,5	1***
Brasil	NBR 15116	ARC	ARH	>90	-	-	3
		ARM	ARM	<90		-	3
China (a)	DG/TJO7/008	Type 1	ARH	>95	<5	0,5	1
		Type 2	ARM	<90	>10	-	-
España	EHE-08	ARH	ARH	-	<5	0,5	****
	GEARD	ARH	ARH	> 90	<10	-	1*
		ARMc	ARC	>70	<30	-	1*
		ARMh	ARM	<70	>30	-	1*
Holanda	CUR	ARH	ARH	>95	<5	-	0,1
	NEN 5905	ARH	ARH	>80		-	-
Japón (a)	JIS A 5021	ARH	ARH	-	-	-	3
Noruega	NB 26	Type 1	ARH	>94	<5	-	1*
		Type 2	ARM	>90		-	1*
Reino Unido	RILEM	Type 1	ARC	-	<100	1	5
		Type 2	ARH	<100		0,5	1
		Type 3	ARH	<20	<10	0,5	1
Suiza	SIAM	BC	ARH		<3	-	1
		BCN	ARM			-	2

* menos del 1% material bituminoso ** 20% material bituminoso y otros

*** menos 5% material bituminoso **** Material bituminoso <1% y vidrio, metal, madera<1%

(a) Esta norma clasifica el AR de acuerdo a sus propiedades

Tabla 3.11: Clasificación de los áridos reciclados según su composición s/ normas.

En la mayoría de los estudios consultados los autores recomiendan la mejora del sistema manual de selección, ya que la inspección visual no es efectiva, debiéndose recurrir a métodos más eficientes (Angulo, Ulsen et al. 2004)¹²¹, que aunque aumenten el coste económico de los áridos reciclados mejoran su ventaja ambiental (Pacheco-Torgal, Dingb et al. 2012)¹²².

3.4.3. Procesos de producción de áridos reciclados

3.4.3.1. Etapas del procesamiento

La producción de áridos reciclados empieza por la deconstrucción, siendo este proceso fundamental para disminuir las impurezas de los escombros. Para el empleo de los áridos reciclados procedentes de escombros es necesario un procesamiento previo de los residuos, en el que podemos diferenciar dos fases (Sánchez de Juan 2004)¹²³:

- a) Demolición selectiva en origen: en esta etapa es importante establecer una serie de precauciones durante el proceso de demolición, para evitar que el escombro se mezcle con tierras u otras sustancias no deseables. Es importante hacer una separación selectiva de los escombros cerámicos y de hormigón, para reducir al máximo los tratamientos posteriores. No obstante, son los fragmentos más pequeños los que son más difíciles de separar y crean más dificultades en el tratamiento de los áridos. De igual forma, es preciso aplicar métodos de demolición que reduzcan "*in situ*" el tamaño de los residuos, para que puedan ser tratados por el sistema de trituración de la planta de reciclaje. Por ejemplo, para plantas móviles los tamaños

¹²¹ Angulo, S. C., C. Ulsen, P. M. Carrijo, R. Silva, M. Jhon and H. Kahn (2004). "Characterization of Brazilian construction and demolition waste coarse recycled aggregate". International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures. RILEM. Brazil, Publications SARL: 87-96.

¹²² Pacheco-Torgal, F., Y. Dingb, S. Miraldoc, Z. Abdollahnejada and J. A. Labrinchac (2012). "Are geopolymers more suitable than Portland cement to produce high volume recycled aggregates HPC". Construction and Building Materials 36: 1048-1052.

¹²³ Sánchez de Juan, M. (2004). Tesis Doctoral. "Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural".

estarán comprendidos entre 400-700 mm, y para plantas fijas a tamaños menores de 1200 mm.

- b) Transformación de los escombros de demolición en áridos: lo realizan las Plantas de Producción de Áridos Recicladados, con instalaciones similares a de las Plantas de Producción de Áridos Naturales, pero con maquinaria específica para la separación de las impurezas existentes.

En la Gráfica 3.2, se describe un proceso habitual de tratamiento de los RCD, obteniendo un producto final de calidad en función del tipo y nivel de al que es sometido.



Gráfica 3.2: Etapas de producción de áridos reciclados.

3.4.3.2. Demolición selectiva

La mayor parte de los residuos de construcción generados provienen de la edificación. Este tipo de residuos generados en obras requieren una separación cuidadosa para evitar la mezcla y contaminación del árido con materiales no deseados, por lo que es necesario realizar los procesos de demolición con técnicas diferentes a los métodos tradicionales.

Si se hace un comparativo entre los sistemas tradicional y selectivo, éstos últimos resultan, en principio, más costosos. No obstante, la demolición selectiva mejora la calidad de los materiales y elimina la necesidad de seleccionar en planta, por lo que se reducen los costes, tanto de transporte como de vertido.

Tampoco podemos olvidar que la demolición selectiva permite conocer mejor las prestaciones del árido reciclado favoreciendo su uniformidad y calidad (Sánchez de Juan 2004)¹²⁴.

3.4.3.3. Etapas del proceso de producción de áridos reciclados

El proceso de producción de áridos reciclados varía de unas plantas productoras a otras, según las necesidades y el destino del producto obtenido. En la Figura 3.9 puede observarse un esquema simplificado de dicho proceso (López Gayarre 2008)¹²⁵. De forma resumida puede describirse con las siguientes operaciones (Alaejos 2006)¹²⁶:

1. Los RCD llegan a la planta mezclados en un contenedor y se descargan en la playa de descarga. Mediante medios mecánicos se extraen las piezas mayores de madera, acero, aislantes y otros metales. Los bloques grandes de hormigón se trituran con martillo hasta reducirlos a un tamaño adecuado.
2. Se realiza un preselección con una criba de tamaño normal 160 mm, dispuesta en serie con otras de tamaños menores, generalmente 80 y 40 mm.
3. Trituración primaria que consta, generalmente de una trituradora y un separador magnético, cabina de triaje, cribas y cintas transportadoras

¹²⁴ Sánchez de Juan, M. (2004). Tesis Doctoral. "Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural".

¹²⁵ López Gayarre, F. (2008). Tesis Doctoral. "Influencia de la variación de los parámetros de dosificación y fabricación de hormigón reciclado estructural sobre sus propiedades físicas y mecánicas", Universidad de Oviedo.

¹²⁶ Alaejos, M. P. (2006). "Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural." ACHE

4. Transporte de los residuos de hormigón mediante una pala cargadora hasta la cinta de alimentación del molino primario o machacadora de mandíbulas.
5. El separador magnético, situado a la salida del molino que separa los elementos metálicos, que se puedan encontrar en el hormigón.
6. El material resultante pasa a una cabina de triaje, donde los operarios de forma manual eliminan los restos de plásticos, maderas o metales no férricos.
7. El árido reciclado se introduce en una tolva de corte de 40 mm mediante una cinta transportadora. Todo lo que pasa se transporta a otras cribas dispuestas en serie, con luces de mallas correspondientes a los cortes de grava, la gravilla y la arena formando diferentes acopios. Lo que queda retenido pasa a la trituración secundaria
8. En la trituración secundaria se reduce el tamaño del material utilizado mediante otro molino hasta obtener la granulometría adecuada.

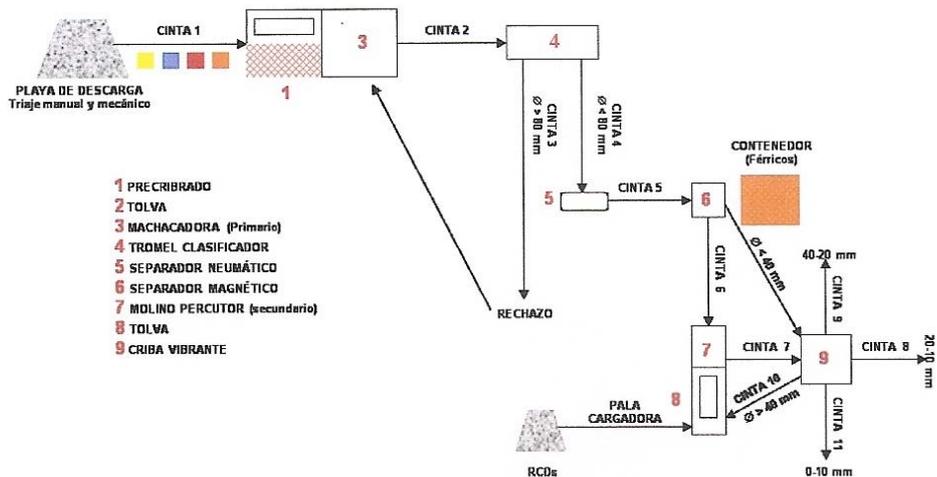


Figura 3.9: Proceso de producción de áridos reciclados en planta fija (López Gayarre 2008)¹²⁵.

3.4.3.4. Plantas de producción de áridos reciclados

La transformación de los áridos reciclados se produce en Plantas de Producción. De acuerdo con el Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-

2015 (Ministerio de Medio Ambiente 2009)¹²⁷, las instalaciones necesarias para la gestión de RCD pueden clasificarse en:

- a) Plantas de valorización: son instalaciones de tratamiento de RCD donde se depositan, seleccionan, clasifican y valorizan las diferentes fracciones que contienen estos residuos, con el fin de conseguir productos aptos para su utilización. Estas pueden ser:
- Plantas fijas: están ubicadas en un emplazamiento cerrado, con autorización administrativa para el reciclaje. Los equipos de tratamiento y trituración son fijos, y no operan fuera del emplazamiento donde están ubicadas.
 - Plantas móviles: están constituidas por maquinaria y equipos de reciclaje móviles, que se desplazan a las obras para reciclar en origen, o a centros de valorización o eliminación para operar temporalmente en dichas ubicaciones.

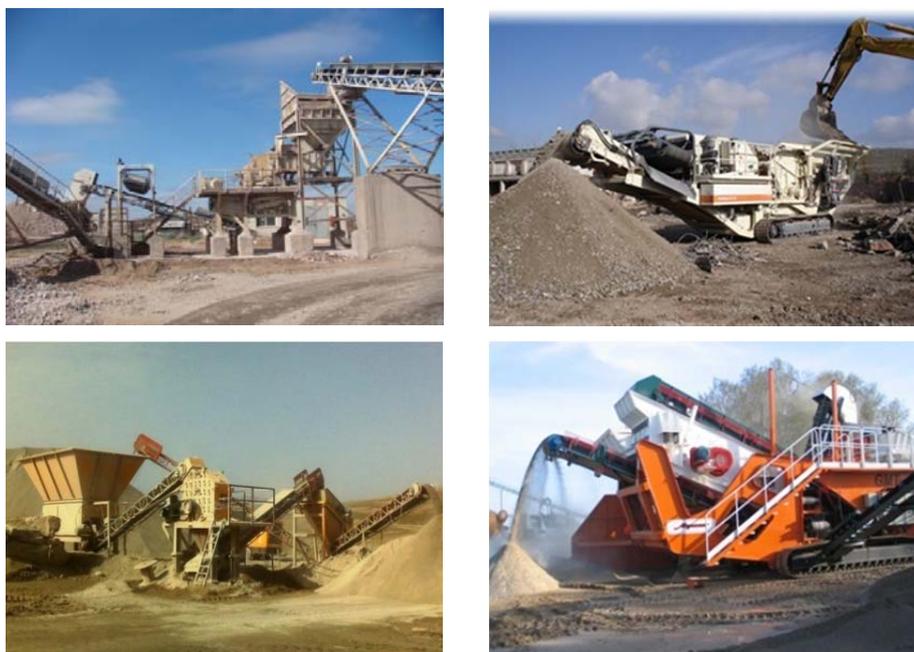


Figura 3.10: Plantas fijas (derecha) y plantas móviles (izquierda).

¹²⁷ Ministerio de Medio Ambiente (2009). "Plan Nacional Integrado de Residuos (2008-2015)." BOE nº 49 de 26 de Febrero de 2009: 19893-20016.

- b) Vertederos controlados: son instalaciones para el vertido de residuos inertes de la construcción que, de forma controlada, van a estar depositados por un tiempo superior a un año.
- c) Plantas de transferencia: son instalaciones para el depósito temporal de RCD que han de ser tratados o eliminados en instalaciones localizadas. Su cometido principal es agrupar los residuos y abaratar costes. En ocasiones se realizan en ellas algún proceso de triaje, y clasificación de las fracciones de residuos, buscando mejorar las características de los RCD enviados a plantas de tratamiento y a vertederos.

En el diagnóstico de la situación del reciclaje en España realizado en el Proyecto GEAR (GEAR 2012)¹²⁸, se encontró que el 12% de las plantas existentes son móviles, un 39% semi-móviles y un 49% plantas fijas.

Dado que la función fundamental de una planta de valorización de RCD es la separación de los diferentes componentes que forman el todo-uno que llega a la planta, éstas se pueden clasificar en función a la tecnología que emplean en el tratamiento de los RCD estableciéndose los siguientes tipos (Sánchez de Juan 2004; Aneiros Rodríguez 2008; Bustillo 2010)^{129 130 131}:

- a) Plantas de Nivel 1: incluyen un desbrozado inicial para retirar los elementos contaminantes y una clasificación de los productos por tamaños. Son instalaciones con menor nivel tecnológico, careciendo de mecanismos de eliminación de contaminantes, a excepción del acero y otros elementos metálicos, por lo que la utilización de mano de obra para la selección inicial es básica.
- b) Plantas de Nivel 2: poseen sistemas mecánicos o manuales de eliminación de contaminantes previos al machaqueo, elementos de

¹²⁸ GEAR, P. (2012). "Guía Española de áridos reciclados procedentes de RCD".

¹²⁹ Sánchez de Juan, M. (2004). Tesis Doctoral. "Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural".

¹³⁰ Aneiros Rodríguez, L. M. (2008). "Tecnología de las plantas de reciclaje de RCD y niveles tecnológicos en la UE". Residuos 103: 56-64.

¹³¹ Bustillo, M. (2010). Manual de RCD y áridos reciclados. Fueyo Editores.

limpieza y clasificación del producto machacado, tanto por vía seca como húmeda. Son las más extendidas en el reciclado del hormigón. Tras un desbrozado previo en la playa de descarga, el residuo se dispone sobre una parrilla mediante pala cargadora para eliminar los fragmentos más voluminosos no retirados previamente. Posteriormente, se trata con un precibador donde se le retira la fracción más fina. Los tamaños mayores se transportan mediante cinta hasta el módulo de triaje manual, donde se separan los materiales valorizables (metal, plástico, papel, madera, etc.). Después del triaje el material se introduce en un triturador y, una vez triturado, se le conduce a una criba mediante cinta transportadora y se le somete a una separación magnética.

- c) Plantas de Nivel 3: son las más tecnológicas y están dirigidas a la reutilización integral de otros materiales secundarios. Su composición es similar a la de Nivel 2, pero incorporando una trituración primaria.
- d) Plantas de Nivel 4: poseen molindas selectivas y clasificaciones en húmedo. No se prevé una aplicación inmediata en España hasta que las tasas de vertido, la obligación de reciclar y los precios de venta de los productos, resulten atractivos.

Como resumen de los equipos presentes en cada Planta, en la Figura 3.14 se representa un diagrama asignando a cada Nivel de Planta los niveles tecnológicos y los procesos asociados (Bustillo 2010)¹³².

La calidad del producto de dos plantas con semejante nivel tecnológico, podrá ser muy diferente dependiendo de los sistemas de separación y clasificación que tenga cada una. Los requisitos de granulometría son muy importantes, y dependerán de los equipos de trituración y de la eficacia del sistema de cribado.

¹³² Bustillo, M. (2010). Manual de RCD y áridos reciclados. Fueyo Editores.

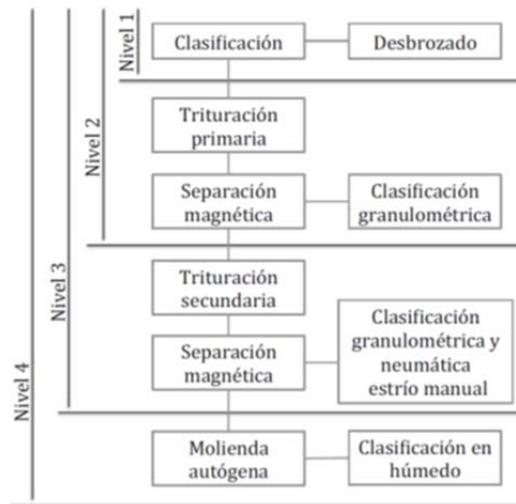


Figura 3.14: Niveles tecnológicos y procesos asociados (Bustillo 2010)¹³².

3.4.3.5. Sistemas de trituración

La etapa de trituración es un factor determinante de la calidad del árido reciclado, dado que este poseerá una mayor o menor pasta de mortero adherido al árido natural (Yagishita, Sano et al. 1993)¹³³, lo que será determinante en su calidad.

Las trituradoras utilizadas pueden ser (European Demolition Association - EDA 1992; Luaces 2007)^{134 135} :

- a) Trituradoras de mandíbulas: generan una cantidad de finos inferior al 10% del material triturado, con lo que los áridos presentan una buena granulometría para fabricar hormigón. Están constituidas por una carcasa o bastidor dispuestos una enfrente de la otra, siendo una de ellas fijas y la otra móvil alrededor de un eje horizontal excéntrico. El material cae por la parte superior y se fragmenta a medida que las

¹³³ Yagishita, F., M. Sano and M. Yamada (1993). Behavior of Reinforced Concrete Beams Containing Recycled Coarse Aggregate. Third International RILEM Symposium.

¹³⁴ European Demolition Association - EDA (1992). "Demolition and Construction Debris: Questionnaire about an EC Priority Waste Stream".

¹³⁵ Luaces, C. (2007). "Los áridos y el cemento. El recorrido de los materiales". C. d. E. e. I. Tecnológica. Comunidad de Madrid.

mandíbulas se van aproximando, mientras que durante la separación éste va cayendo por gravedad por la abertura inferior.

- b) Trituradoras de impacto: permiten obtener altos valores de reducción y un producto más fino obtenido en menos etapas de trituración, lo que supone reducir costes. Generan hasta un 40% de finos y su mayor problema es el gran desgaste de los martillos. Están formadas por un rotor horizontal en el que se montan las barras golpeadoras, cuya misión es fracturar el material que entra por la parte superior.
- c) Trituradoras de conos: permiten rendimientos elevados disminuyendo los costes de desgaste y mantenimiento. No admiten tamaños muy grandes de partículas (menores de 200 mm), por lo que son apropiadas para la trituración secundaria. La cantidad de finos producida está en torno al 20%.

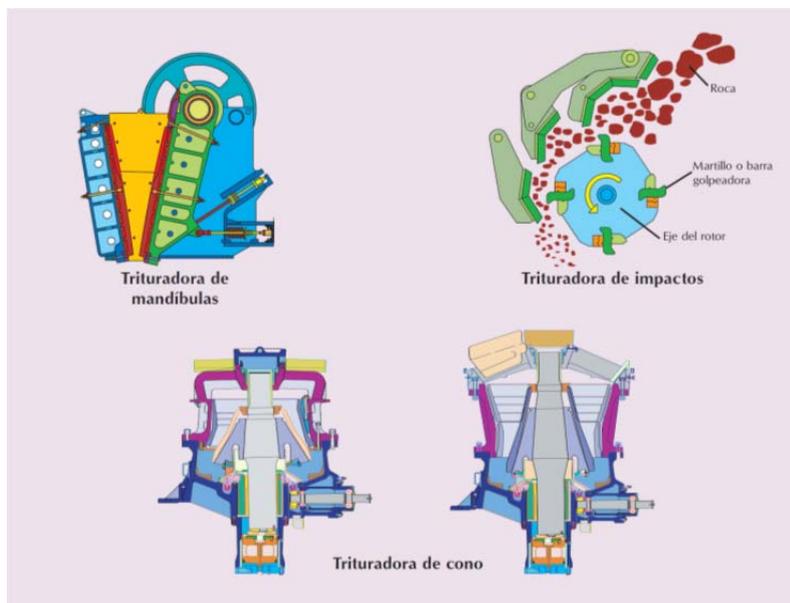


Figura 3.11: Sistemas de trituración (Luaces 2007)¹³⁶.

¹³⁶ Luaces, C. (2007). "Los áridos y el cemento. El recorrido de los materiales". C. d. E. e. I. Tecnológica. Comunidad de Madrid.

En la Tabla 3.12, se resumen las principales propiedades de cada uno de los tres sistemas de trituración (European Demolition Association-EDA 1992)¹³⁷.

CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE TRITURACIÓN			
Propiedad	Mandíbulas	Cono	Impacto
Capacidad	Alto	Medio	Bajo
Coste producción	Bajo	Medio	Alto
Desgaste	Bajo	Medio	Alto
Calidad árido	Bajo	Medio	Alto
Contenido finos	Bajo	Medio	Alto
Consumo energía	Bajo	Medio	Alto

Tabla 3.12: Características de los distintos sistemas de trituración.

Pueden existir uno o varios procesos de trituración, en los que se emplean diferentes tipos de maquinaria. La combinación más frecuente de maquinaria para la trituración primaria y secundaria se describe en la Tabla 3.13 (European Demolition Association - EDA 1992)¹³⁷.

TRITURACIÓN PRIMARIA	TRITURACIÓN SECUNDARIA
Trituradora de mandíbulas	Trituradora de conos o giratoria
Trituradora de mandíbulas	Trituradora de impactos
Trituradora de impactos	Trituradora de impactos
Trituradora de impactos	

Tabla 3.13: Combinaciones entre sistemas de trituración.

La elección de cada una de ellas depende de tres factores: el consumo de energía, el coste de producción y la calidad del producto obtenido. En los Países Bajos, donde cuentan con una amplia experiencia en el reciclado de escombros, la combinación más utilizada es la trituradora de mandíbulas para la molturación primaria, debido a su capacidad y reducido coste, y la

¹³⁷ European Demolition Association - EDA (1992). "Demolition and Construction Debris: Questionnaire about an EC Priority Waste Stream".

trituradora de impacto en la molienda secundaria, consiguiendo así una mayor calidad del árido obtenido (Sánchez de Juan 2004)¹³⁸.

3.4.3.6. Sistemas de cribado

La clasificación de los productos en función a su tamaño se realiza mediante cribas con luces de malla diferentes. Estas técnicas de selección incorporan sistemas vibrantes de baja frecuencia y gran amplitud, que agilizan el proceso de tamizado. Las cribas inclinadas son las más adecuadas para separar los finos (RILEM-International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures 2006)¹³⁹.

3.4.3.7. Eliminación de impurezas

Un aspecto diferenciador del proceso de obtención del árido reciclado respecto al del árido natural es el sistema de eliminación de las impurezas y otros contaminantes. Las técnicas usualmente utilizadas para ello derivan, generalmente, de su aplicación en la industria minera (Grupo de Trabajo 2/5 "Hormigón Reciclado" 2006)¹⁴⁰.

Los residuos de demolición incorporan cierta cantidad de impurezas y contaminantes como metales, madera, plásticos, yeso, etc., que deben ser eliminados para garantizar la calidad de los hormigones y morteros realizados con ellos. Esta eliminación se realiza utilizando distintas técnicas según sea la naturaleza de las impurezas.

Habitualmente se utilizan tres sistemas de eliminación: tamizado, la eliminación manual y la separación mediante cintas magnéticas. A continuación se describen cada una de ellas (Grupo de Trabajo 2/5 "Hormigón Reciclado" 2006)¹⁴⁰ (Sánchez de Juan 2004)¹³⁸:

¹³⁸ Sánchez de Juan, M. (2004). Tesis Doctoral. "Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural".

¹³⁹ RILEM-International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures (2006). "Demolición y Reciclajes del concreto y la mampostería, especificaciones para concreto con agregados reciclados."

¹⁴⁰ Grupo de Trabajo 2/5 "Hormigón Reciclado" (2006). "Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural".

- a) Tamizado: con este sistema se eliminan las impurezas de menor tamaño, como la tierra, pudiéndose realizar en varias etapas para que resulte más efectivo.
- b) Eliminación manual de impurezas: con esta técnica se retiran los contaminantes de mayor tamaño, que otros sistemas no pueden eliminar.
- c) Separación magnética: los residuos de construcción contienen importantes cantidades de acero que pueden separarse magnéticamente. Esta separación se realiza después del machaqueo, para no dañar las cintas transportadoras, consiguiendo retirar los componentes metálicos de las armaduras, además de otras impurezas metálicas.

En los residuos puede haber además otros elementos metálicos no férricos, como aluminio, plomo, zinc y aleaciones que no tienen comportamiento magnético y que se separan mediante las conocidas como “corrientes Foucault”. Este método se basa en que cuando un metal atraviesa un campo magnético variable, se forman las corrientes Foucault, lo que produce la separación por repulsión de los metales no magnéticos y no ferrosos. El material más sencillo de separar es el aluminio.

La separación de los materiales de baja densidad puede realizarse en seco o por vía húmeda. En seco se utiliza la separación manual previa a la mecánica, para después separar las impurezas ligeras mediante potentes corrientes de aire (Kohler and Kurkowski 1998)¹⁴¹. Al final de la cinta transportadora, antes de la caída, se aplica una corriente horizontal para arrastrar los materiales ligeros.

La separación por vía húmeda se basa en la eliminación de las impurezas mediante la flotación de los materiales de baja densidad. Se deposita el material ligero en una balsa con agua o cintas transportadoras dispuestas de tal forma que se proyecte un chorro de agua en sentido opuesto al

¹⁴¹ Kohler, G. and H. Kurkowski (1998). "Optimising the Use of RCA. Use of Recycled Concrete Aggregate, Sustainable Construction". Dhir, Henderson y Imachiya.

movimiento de la cinta (Sistema Aquamator) (Kohler and Kurkowski 1998)¹⁴² (Jungmann and Quindt 1998)¹⁴³; su mayor inconveniente es la generación de barros.

Los contenidos de impurezas influyen negativamente en la fabricación de hormigones y morteros, induciendo una reducción de su resistencia, por lo que distintas normativas y recomendaciones limitan el contenido de impurezas en los áridos reciclados de hormigón.

MÁXIMO CONTENIDO EN IMPUREZAS % PESO TOTAL MUESTRA				
Impurezas	RILEM	BRE	BS 8500	EHE08
Asfalto	1		5	1
Material cerámico			5	5
Partículas ligeras		0,5	0,5	1
Otras impurezas	1	1	1	1

Tabla 3.14: Límite máximo de impurezas según normas.

Cuando se procesan hormigones para la obtención de árido reciclado de hormigón, debe comprobarse la existencia de áridos potencialmente reactivos a los álcalis, debiéndose evitar el hormigón de cemento aluminoso y determinarse los contenidos originales de sulfatos y cloruros. Asimismo, deben rechazarse como materia prima los hormigones con procesos patológicos.

La presencia de yeso debe de ser reducida a través de severos criterios de aceptación del residuo de demolición, rechazándose las partidas que contengan cantidades importantes de tal naturaleza.

3.4.3.8. Otros tratamientos

Existen otros tratamientos que permiten obtener áridos de muy buena calidad, mediante una separación casi total del mortero que se encuentra

¹⁴² Kohler, G. and H. Kurkowski (1998). "Optimising the Use of RCA. Use of Recycled Concrete Aggregate, Sustainable Construction". Dhir, Henderson y Imachiya.

¹⁴³ Jungmann, A. and J. Quindt (1998). Properties of Recycled form Concrete, Demolition and Reuse of Concrete and Masonary.

adherido al árido reciclado. Entre estos tratamientos destaca el tratamiento térmico y el sistema japonés “Cyclite” (Sánchez de Juan 2004)¹⁴⁴. Aunque la utilización de estos sistemas está menos generalizada, se hace una breve explicación de los mismos:

- a) Tratamiento térmico (Larbi, Heijnen et al. 2000)¹⁴⁵ (Mulder, Blaakmeer et al. 2003)¹⁴⁶; se realiza una trituración inicial para reducir el tamaño del árido a 10 cm y se eliminan las impurezas mediante cinta magnética. Posteriormente, se introducen en un horno rotatorio a una temperatura mínima de 700°C, separando el mortero adherido mediante una combinación de calor y movimiento. Por último, el material se clasifica con una tamizadora vibrante y un separador de aire en tres fracciones: árido grueso, árido fino y polvo de cemento (partículas inferiores a 150 micras). Tras el tratamiento se obtiene un árido reciclado de elevada calidad, en el que la fracción del mortero adherido no supera el 5%, y se consigue la reutilización completa de los escombros, ya que el polvo de cemento puede utilizarse en la fabricación de cemento.
- b) Cyclite: comprende una primera etapa de eliminación de impurezas de los residuos de hormigón mediante una trituradora de mandíbulas para reducir el escombros hasta 40 mm, y una segunda de trituración, en la que el material se introduce una trituradora entre el cilindro exterior e interior. La calidad del árido reciclado obtenido es comparable a la del árido natural.

¹⁴⁴ Sánchez de Juan, M. (2004). Tesis Doctoral. "Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural".

¹⁴⁵ Larbi, J. A., W. M. M. Heijnen, J. P. P. Brouwer and E. Mulder (2000). Preliminary Laboratory Investigation of Thermally Treated Recycled Concrete Aggregate for General Use in Concrete. The fourth International Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials. United Kingdom.

¹⁴⁶ Mulder, E., J. Blaakmeer, K. Van Dijk and T. M. Nijland (2003). Closed Material Cycles for Concrete and Masonry, as Part of an Integrated Process for the Reuse of the Total Flow of C&D Waste. Proceedings of the Fifth International Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials San Sebastian.

- c) Existe un dispositivo patentado llamado Frantz Isodynamic, que puede separar los tamaños comprendidos entre 10 μm y 2 mm eficazmente utilizando los campos magnéticos. Las experiencias efectuadas han permitido separar y obtener ladrillo con una pureza del 93% y mortero con una pureza del 87%.

3.4.3.9. Almacenamiento en planta

El almacenamiento en planta del árido reciclado ya producido, debe hacerse según las recomendaciones contenidas en la Norma japonesa, las cuales se indican a continuación:

- a) Almacenar por separado los áridos procedentes de hormigones de distintas cualidades.
- b) Almacenar separadamente el árido reciclado grueso y el fino.
- c) Separar los áridos reciclados de los naturales.
- d) Para utilizar el árido grueso saturado de agua (se aconseja utilizar el árido grueso saturado, debido a su gran absorción) las tolvas deberán estar provistas de aspersores u otro mecanismo para mantener las condiciones de saturación.
- e) No conviene almacenar los áridos finos durante periodos largos de tiempo, ya que pueden solidificar en bloques.

3.4.4. Propiedades físicas de los áridos reciclados

3.4.4.1. Granulometría

Para la clasificación de las distintas fracciones se siguen las recomendaciones de la Instrucción EHE-08, la cual nos remite a la Norma EN 933-1, en la que se establece la serie básica de los tamices en los siguientes: 0,063-0,125-0,25-0,5-1-2-4-8-16-31,5-63 y 125 mm. Estos tamices son utilizados para el árido fino, para el árido grueso utilizaremos la serie 10-20-40 mm y la anteriormente citada.

La granulometría de los áridos reciclados depende fundamentalmente del proceso de trituración realizado en su obtención. Las trituradoras de impacto, por lo general, son las que permiten alcanzar reducidos tamaños de áridos,

produciendo como consecuencia, mayor cantidad de finos, después están las trituradoras de conos y en último lugar las de mandíbulas.

El porcentaje de árido grueso generado oscila entre el 70% y el 90% del árido total producido, dependiendo de la composición del hormigón original y del tamaño máximo del árido (European Demolition Association - EDA 1992)¹⁴⁷. Las recomendaciones y exigencias granulométricas de los áridos reciclados no varían con relación a los áridos naturales.

Existen estudios que describen como al utilizar trituradoras de mandíbula, y posteriormente una de impacto, la tasa de recuperación de árido reciclado grueso se reduce a 60%, mientras que con procesos adicionales se consiguen áridos reciclados de alta calidad con mínimos contenidos de mortero adherido, aunque su tasa de recuperación desciende al 35% (Nagataki, Gokce et al. 2004)¹⁴⁸.

En general, los áridos reciclados que proceden de hormigones de una mayor resistencia para un mismo tamaño de árido y sistema de trituración, presentan módulos granulométricos ligeramente superiores a los que proceden de hormigones con menores resistencias. (Hendriks, Janssen et al. 2005)¹⁴⁹.

Según estudios españoles realizados (Sánchez de Juan 2004)¹⁵⁰, el porcentaje de finos generados, al desprenderse pequeñas partículas de mortero durante la manipulación del árido grueso, varía entre el 0,27% y el 1,14%. La Instrucción EHE-08 establece el límite de áridos finos admisible en el 1% del árido grueso, lo cual se cumple en la mayoría de los casos.

¹⁴⁷ European Demolition Assotion - EDA (1992). "Demolition and Construction Debris : Questionnaire about an EC Priority Waste Stream".

¹⁴⁸ Nagataki, S., A. Gokce, T. Saeki and M. Hisada (2004). "Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates". *Cement and Concrete Research* 34(6): 965-971.

¹⁴⁹ Hendriks, C. F., G. Janssen and E. Vazquez (2005). *Recycled aggregate in concrete*, RILEM.

¹⁵⁰ Sánchez de Juan, M. (2004). Tesis Doctoral. "Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural".

Esta fracción de finos, como comentaremos posteriormente, puede afectar al proceso de adherencia entre los finos y la pasta de cemento, provocando la necesidad de aportar una mayor cantidad de agua en el proceso de amasado y problemas de expansión, que dependerán de la cantidad de sulfatos que contengan los áridos.

Diferentes normativas limitan el uso y porcentaje de incorporación de estos áridos reciclados finos, dependiendo de la utilización posterior de la mezcla de hormigón. Así, por ejemplo, la Instrucción Española EHE-08, en su Anejo 15, admite un porcentaje máximo de desclasificados (partículas inferiores a 4mm) del 10%, valores superiores a los admitidos por las recomendaciones de la RILEM (RILEM-International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures 2006)¹⁵¹, donde establece el límite en el 5%.

Los áridos tanto para morteros como para hormigones se describen con dos letras d/D, las cuales especifican el tamaño, en mm, menor y mayor. De acuerdo con esto, se prefieren para morteros los áridos con los siguientes tamaños: 0/1 mm, 0/2 mm, 0/4 mm, 0/8 mm, 2/4 mm, y 2/8 mm; es decir, se aceptan todos los tamaños entre 0 y 8 mm (en este sentido, muchos morteros pueden considerarse, básicamente, como hormigones, dado que sus componentes serían prácticamente los mismos).

Pero aún más, la Norma UNE-EN 13139 (AENOR 2003)¹⁵² explicita textualmente “se prefieren”, es decir, que no hay impedimento para fabricar un mortero con un árido que se separe de los tamaños anteriormente expuestos. Aunque luego la Norma UNE-EN 998-2 (AENOR 2012)¹⁵³ dice en su apartado 5.5.2 que “el tamaño de los áridos, en los morteros para juntas y capas finas, no debe ser mayor de 2 mm”.

¹⁵¹ RILEM - International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures (2006). "Demolición y Reciclajes del concreto y la mampostería, especificaciones para concreto con agregados reciclados".

¹⁵² AENOR (2003). UNE-EN 13.139. "Aridos para morteros".

¹⁵³ AENOR (2012). UNE-EN 998-2 : "Especificaciones para morteros de albañilería. Parte 2 : Morteros de albañilería".

La realidad es que los fabricantes, por muchas razones, algunas propias, y otras de los clientes, suelen centrar sus productos en determinados tamaños.

En la Tabla 3.15, se muestran los principales tipos de morteros y los tamaños de grano que acostumbran a incorporar (Bustillo 2010)¹⁵⁴.

La granulometría es una variable en la fabricación de morteros que no ha recibido la atención debida. La antigua NBE FL-90 incluía en su Apartado 3.1.3, dedicado a las arenas de los morteros, un huso granulométrico al cual debían de ajustarse las arenas utilizadas en los morteros (Tabla 3.16).

TIPO DE MORTERO	TAMAÑO DE ÁRIDO
Albañilería	< 2 mm
Revoco y enlucido	< 1 mm
Monocapa	< 1,5 mm
Adhesivos cementosos	< 2 mm
Materiales de rejuntado	< 0,2 mm
Autonivelantes	< 2 mm
Impermeabilizantes	< 1,25 mm
Tematización	< 0,7 mm
Reparación de hormigón	< 2,5 mm

Tabla 3.15: Tipos de morteros y tamaños de los áridos para su fabricación.

Tamiz (mm.)	% que pasa	Condiciones
5,00	a	a=100
2,50	b	60=b=100
1,25	c	30=c=100 c-d=50
0,63	d	15=d=70 d-e=50
0,32	e	5=e=50 c-e=50
0,16	f	0=f=30

Tabla 3.16: Huso granulométrico de la arenas según NBE-FL-90.

¹⁵⁴ Bustillo, M. (2010). Manual de RCD y áridos reciclados, Fueyo Editores.

Este uso desapareció en el Código Técnico de la Edificación y tampoco está presente en la Norma UNE-EN 998-2 (AENOR 2012)¹⁵⁵, por lo que se puede concluir que la libertad de opción que hay para dosificar las diferentes fracciones en la arena del mortero es absoluta. La Norma sólo establece las referencias a los límites superiores e inferiores, para el filler del árido y para el contenido de finos. Sin embargo, la norma americana ASTM C144, establece el huso granulométrico que debe cumplir la arena, tanto si es de origen natural como artificial. En el valor medio de este huso estaría según estudios, la arena "ideal" (Conway and Behie 2006)¹⁵⁶.

3.4.4.2. Densidad

La densidad del árido reciclado es inferior a la del árido natural, debido a la presencia del mortero adherido y a otras impurezas, como el yeso (Katz 2003)¹⁵⁷. La mayor porosidad que confiere el mortero adherido al árido reciclado respecto al árido natural, hace que los beneficios que proporciona la pasta, protegiendo las armaduras frente a los ataques por cloruros y otros agentes corrosivos, sean menores de los esperados (Sim and Park 2011)¹⁵⁸.

Esta menor densidad contribuirá a que los morteros elaborados con áridos reciclados presenten una menor trabajabilidad, una mayor demanda de agua en estado fresco y, por consiguiente, una disminución en su resistencia. No obstante, la menor densidad de los morteros fabricados con áridos reciclados resulta de interés para aquellas aplicaciones en donde se necesite un menor peso propio de los elementos fabricados con ellos.

¹⁵⁵ AENOR (2012). UNE-EN 998-2. "Especificaciones para morteros de albañilería. Parte 2 : Morteros de albañilería".

¹⁵⁶ Conway, T. and W. Behie (2006). "Sand gradation influence on masonry mortar properties." *Masonry Today* 16: 1-4.

¹⁵⁷ Katz, A. (2003). "Properties of concrete made whit recycled aggregate from partially hydrated old concrete". *Cement and Concrete Research* 33 (5): 703-711.

¹⁵⁸ Sim, J. and C. Park (2011). "Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete whit varying amount of fly ash and fine recycled aggregate." *Waste Management* 29(9): 2352-2548.

Los factores que influyen en la densidad de las arenas recicladas son, por su importancia, las técnicas utilizadas en su producción, el tamaño medio de las fracciones obtenidas, y la calidad del material de origen.

La densidad de las arenas producidas con trituradoras de mandíbulas o de conos es ligeramente superior a las que se obtienen cuando se emplea una trituradora de impacto (Marmash and Elliott 2000)¹⁵⁹. Además, mediante sucesivos procesos de trituración se puede llegar a conseguir una arena de mejor calidad, ya que se reduce considerablemente la cantidad de pasta de cemento adherida a los granos (Nagataki, Gokce et al. 2000)¹⁶⁰.

La densidad de los áridos reciclados de hormigón depende de la resistencia del hormigón en origen. Los áridos obtenidos de hormigones de mayor resistencia tendrán mayor densidad (Hansen and Narud 1983)¹⁶¹. En el caso de los áridos cerámicos dependen fundamentalmente de su composición, del tipo de cerámica usada y de la cantidad de arena utilizada en la fabricación de los ladrillos (Geraldés 2013)¹⁶².

La diferencia de densidad entre los áridos naturales gruesos y finos varía entre 2570 y 2520 Kg/m³ respectivamente, mientras que los áridos reciclados presentan una mayor diferencia entre ellos, variando entre 2350-2470 Kg/m³ de los gruesos y 2260-2390 kg/m³ de los finos (Poon, Kou et al. 2002)¹⁶³.

La densidad presenta, incluso en áridos reciclados de hormigón, una dispersión muy elevada, debido a que la densidad origen de los hormigones puede ser muy diferente. De los datos obtenidos en la bibliografía consultada,

¹⁵⁹ Marmash, B. E. and K. S. Elliott (2000). The properties of recycled precast concrete hollow core slabs for use as replacement aggregate in concrete. Waste Management Series 1: 769-781.

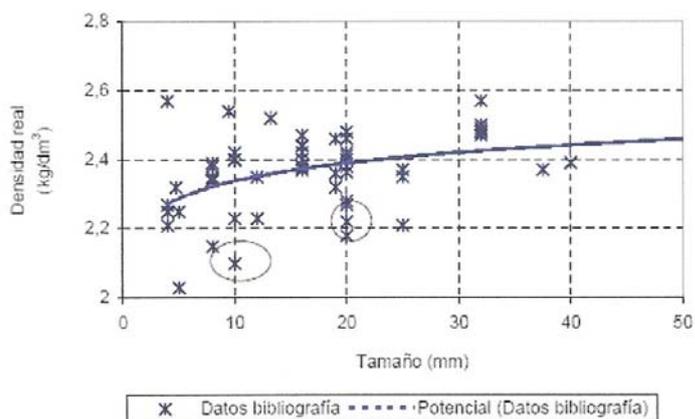
¹⁶⁰ Nagataki, S., A. Gokce and T. Saeki (2000). Effects of recycled aggregate characteristics on the performance parameters of recycled aggregate concrete. Proceedings of the Fifth Canmet/ACI International Conference on Durability of Concrete. Barcelona: 51-71.

¹⁶¹ Hansen, T. C. and H. Narud (1983). "Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate." Concrete International 5 (1): 79-83.

¹⁶² Geraldés, V. L. (2013). "Estudio de hormigones reciclados no estructurales fabricados con árido reciclado mixto: propiedades mecánicas y expansión debida al contenido en sulfatos". Universidad Politécnica de Madrid.

¹⁶³ Poon, C. S., S. C. Kou and S. Lam (2002). "Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks." Construction and Building Materials 16(5): 281-289.

la densidad de los áridos reciclados es ligeramente superior en las fracciones más gruesas que en las más finas. (Sánchez de Juan 2004; CEDEX 2013)¹⁶⁴ ¹⁶⁵.



Gráfica 3. 2: Relación entre la densidad y el tamaño máximo del árido reciclado (Sánchez de Juan 2004)¹⁶⁴.

Según un estudio de realizado en el Proyecto TTIGEM (Transferencia de Tecnología en temas de Ingeniería Geotécnica, de Estructuras y de Materiales, y de impacto de infraestructuras de interés para el Reino de Marruecos y Andalucía) sobre materiales de construcción, incluyendo materiales marginales y residuos aprovechables, realizado sobre 14 arenas recicladas de hormigón y dos arenas calizas de machaqueo, la densidad aparente varía entre 2190 y 2750 Kg/m³ (CEDEX 2013)¹⁶⁵. Según otros estudios y bibliografía consultada, los arenas recicladas presentan una densidad aparente entre 2060 a 2650 Kg/m³ (Marmash and Elliott 2000)¹⁶⁶.

¹⁶⁴ Sánchez de Juan, M. (2004). Tesis Doctoral. "Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural".

¹⁶⁵ CEDEX (2013). Transferencia tecnológica relativa a materiales de construcción, incluyendo materiales marginales y residuos aprovechables, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio ambiente.

¹⁶⁶ Marmash, B. E. and K. S. Elliott (2000). "The properties of recycled precast concrete hollow core slabs for use as replacement aggregate in concrete." Waste Management Series 1(C): 769-781.

DENSIDAD APARENTE EN LA FRACCIÓN FINA (Kg/m ³)		
Referencia Bibliográfica	Árido convencional	Árido reciclado
(Poon, Kou et al. 2002) ¹⁶⁷	2520	2390-2260
(Sani, Moriconi et al. 2004) ¹⁶⁸	-	2280
(Tu, Chen et al. 2006) ¹⁶⁹	2580	2340
(Poon and Chan 2007) ¹⁷⁰	-	2130
(Evangelista and de Brito 2007) ¹⁷¹	2560	2165
(Hung, Nam et al. 2008) ¹⁷²	-	2220
(Vegas, Azkarate et al. 2009) ¹⁷³	-	2220-2670

Tabla 3.17: Densidad áridos reciclados comparadas con áridos convencionales según diversos autores.

De las investigaciones consultadas se puede afirmar que las densidades más altas se dan en el caso de áridos reciclados finos de hormigón (ARH) con valores de densidad entre 2280 a 2670 Kg/m³, y en los áridos reciclados finos cerámicos (ARC), entre 2350 a 2680 Kg/m³; por el contrario, los áridos reciclados finos mixtos (ARM) presentan las densidades más bajas, con valores entre 2170 a 2400 Kg/m³. En la Tabla 3.18, se han representado las densidades de éstos de manera abreviada, en función de cada tipo de árido

¹⁶⁷ Poon, C. S., S. C. Kou, et al. (2002). "Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks". *Construction and Building Materials* 16(5): 281-289.

¹⁶⁸ Sani, D., G. Moriconi, et al. (2004). "Leaching and mechanical behaviour of concrete manufactured with recycled aggregates". *Waste Management* 25: 177-182.

¹⁶⁹ Tu, T.-Y., Y.-Y. Chen, et al. (2006). "Properties of HPC with recycled aggregates". *Cement and Concrete Research* 36(5): 943-950.

¹⁷⁰ Poon, C. S. and D. Chan (2007). "Effects of contaminants on the properties of concrete paving blocks prepared with recycled concrete aggregates." *Construction and Building Materials* 21(1): 164-175.

¹⁷¹ Evangelista, L. and J. de Brito (2007). "Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates". *Cement and Concrete Composites* 29(5): 397-401.

¹⁷² Hung, L. V., V. H. Nam, et al. (2008). "Study on recycled demolished building waste to use as aggregate for concrete for concrete and mortar". *The 3^oACF International Conference-ACV/VCA*: 644-650.

¹⁷³ Vegas, I., I. Azkarate, et al. (2009). "Diseño y prestaciones de morteros de albañilería con áridos reciclados procedentes de escombros de hormigón". *Materiales de Construcción* 59.

DENSIDAD APARENTE EN LA FRACCIÓN FINA (Kg/m ³)			
Referencias bibliográficas	ARH	ARM	ARC
(Barra de Oliveira and Vázquez 1996) ¹⁷⁴		2250	
(Dapena, Alaejos et al. 2011) ¹⁷⁵		2300	
(Deshpande and Kulkarni 2011) ¹⁷⁶		2290	
(Gómez Sobreron 2002) ¹⁷⁷		2170	
(González Fonteboa and Martínez Abella 2005) ¹⁷⁸		2130	
(Katz 2003) ¹⁷⁹		2230-2250	
(Mas, Cladera et al. 2012) ¹⁸⁰		2170-2360	
Becerra	2560		2350
Becerra	2600		
(Miranda and Selmo 2002) ¹⁸¹	2670		2680
(Sim and Park 2011) ¹⁸²	2280		
(Debied and Kenai 2008) ¹⁸³			2496

Tabla 3.18: Densidad fracción fina de los áridos reciclados según diversos autores.

¹⁷⁴ Barra de Oliveira, M. and E. Vazquez (1996). "The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete." *Waste Management* 16(1-3): 113-117.

¹⁷⁵ Dapena, E., P. Alaejos, et al. (2011). "Effect of Recycled Sand Content on Characteristics of Mortars and Concretes." *Journal of Materials in Civil Engineering* 23(4): 414-422.

¹⁷⁶ Deshpande, N. and S. S. Kulkarni (2011). "Critical analysis of Recycled aggregate and concrete with Recycled aggregate." *Applied Mechanics and Materials* 99-100: 1274-1280

¹⁷⁷ Gómez Sobreron, J. M. V. (2002). "Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study." *Cement and Concrete Research* 32(8): 1301-1311.

¹⁷⁸ González Fonteboa, B. and F. Martínez Abella (2005). "Recycled aggregates concrete: Aggregate and mix properties " *Materiales de Construcción* 55(279): 53-66.

¹⁷⁹ Katz, A. (2003). "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete." *Cement and Concrete Research* 33(5): 703-711.

¹⁸⁰ Mas, B., A. Cladera, et al. (2012). "Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use." *Construction and Building Materials* 27(1): 612-622.

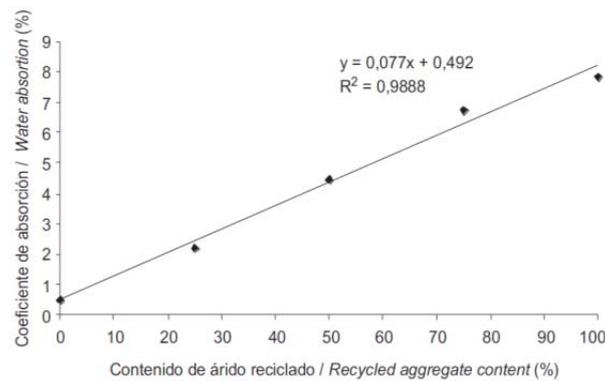
¹⁸¹ Miranda, L. and S. Selmo (2002). "Construction and demolition waste variability and its influence on masonry and plastering mortars properties." University of Sao Paulo. Escola Politécnica. Civil Construction Engineering Department.

¹⁸² Sim, J. and C. Park (2011). "Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate." *Waste Management* 29(9): 2352-2548.

¹⁸³ Debied, F. and S. Kenai (2008). "The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete." *Construction and Building Materials* 22(5): 886-893.

3.4.4.3. Absorción

La absorción de los áridos reciclados presenta una mayor variación respecto a los áridos naturales, debido a la naturaleza porosa y absorbente del mortero adherido. Así, en la Gráfica 3.2, se muestra la evolución del Coeficiente de Absorción en función del contenido en árido reciclado de la mezcla (Vegas, Azkarate et al. 2009)¹⁸⁴.



Gráfica 3. 3: Variación del coeficiente de absorción en función del porcentaje de árido reciclado (Vegas, Azkarate et al. 2009)¹⁸⁴.

Mientras la absorción de los áridos naturales oscila entre 0% al 4%, en los áridos reciclados este valor, según diferentes estudios, va desde un 3% hasta un 13%, sobrepasando generalmente el límite del 5% establecido por la Norma EHE-08.

También existe una gran diferencia entre la absorción de los áridos gruesos y finos. Mientras que para los áridos naturales gruesos y finos se alcanzan valores entre 1,25% y el 1,01% respectivamente, los áridos reciclados mostraban valores del 7,6% en la fracción gruesa, y de un 14,21% para la fracción fina. (Poon, Kou et al. 2002)¹⁸⁵.

¹⁸⁴ Vegas, I., I. Azkarate, et al. (2009). "Diseño y prestaciones de morteros de albañilería con áridos reciclados procedentes de escombros de hormigón." *Materiales de Construcción* 59.

¹⁸⁵ Poon, C. S., S. C. Kou, et al. (2002). "Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks". *Construction and Building Materials* 16(5): 281-289.

En general, los aspectos que influyen en la absorción de los áridos reciclados son:

- a) Tamaño de la partícula: las fracciones pequeñas, debido a la mayor concentración de pasta de cemento que contienen, presentan una mayor absorción (Barra 1996)¹⁸⁶, siendo más acusado cuanto menor es la densidad del árido reciclado.
- b) Calidad del hormigón original: los hormigones con baja relación agua-cemento, de elevadas resistencias, dan lugar a áridos reciclados de mayor calidad, mayor densidad y menores absorciones (Sánchez de Juan 2004)¹⁸⁷.
- c) Técnicas de procesado: cuando el proceso de obtención del árido reciclado se realiza mediante sucesivas etapas de trituración, se elimina el mayor contenido adherido de mortero, obteniendo áridos de mayor calidad, mayor densidad y menor adsorción (Grupo de Trabajo 2/5 "Hormigón Reciclado" 2006; López Gayarre, Serna et al. 2009; Agrela, Sanchez de Juan et al. 2011)^{188 189 190}.

El problema que genera la alta absorción es la manejabilidad del hormigón o mortero en estado fresco. Algunos autores sugieren utilizar áridos presaturados para la producción de hormigones y morteros (Tam, Wang et al. 2008)¹⁹¹. Otros estudios hacen hincapié en la medición de la absorción, no solo a las 24 horas, sino a 10 y 30 minutos (Evangelista and de Brito 2010;

¹⁸⁶ Barra, M. (1996). Estudio de la Durabilidad del Hormigón de Árido Reciclado en su aplicación como Hormigón Estructural, Universidad Politécnica de Cataluña.

¹⁸⁷ Sánchez de Juan, M. (2004). "Tesis Doctoral. "Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural".

¹⁸⁸ Grupo de Trabajo 2/5 "Hormigón Reciclado" (2006). "Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural".

¹⁸⁹ López Gayarre, F. (2008). Tesis. "Influencia de la variación de los parámetros de dosificación y fabricación de hormigón reciclado estructural sobre sus propiedades físicas y mecánicas". Universidad de Oviedo.

¹⁹⁰ Agrela, F., M. Sanchez de Juan, et al. (2011). "Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete". *Construction and Building Materials* 25 (10) 25(10): 3950-3955.

¹⁹¹ Tam, V. W. Y., K. Wang, et al. (2008). "Assesing relationships of concrete recycling decision and implementation in construction industry". *Journal of hazardous materials* 152(2): 703-714.

Djerbi Tegger 2012; Mas, Cladera et al. 2012)¹⁹² ¹⁹³ ¹⁹⁴, para observar el comportamiento de los áridos reciclados en contacto con agua y desarrollar pautas de presaturación (Tam, Gao et al. 2005; González-Fonteboa and Martínez-Abella 2008)¹⁹⁵ ¹⁹⁶, que mejoren las prestaciones finales de hormigones o morteros.

En la bibliografía consultada se han encontrado diferentes pruebas experimentales en las que se áridos reciclados se han presaturado al 80% de su absorción (Etxeberria, Vázquez et al. 2007)¹⁹⁷, mientras que en otros proponen una saturación de 24 horas antes de su utilización (Debied and Kenai 2008)¹⁹⁸. En otros trabajos se propone mezclar el árido reciclado durante 15 minutos con el agua de amasado y luego continuar posteriormente con la dosificación (Katz 2003)¹⁹⁹. Hay trabajos en los que se elimina la mayor parte del mortero adherido del árido reciclado, introduciéndolos en tres tipos diferentes de ácidos (Tam, Tam et al. 2007)²⁰⁰.

¹⁹² Evangelista, L. and J. de Brito (2007). "Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates". *Cement and Concrete Composites* 29(5): 397-401.

¹⁹³ Djerbi Tegger, A. (2012). "Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach." *Construction and Building Materials* 27(1): 112-116.

¹⁹⁴ Mas, B., A. Cladera, et al. (2012). "Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use." *Construction and Building Materials* 27(1): 612-622.

¹⁹⁵ Tam, V. W. Y., X. F. Gao and C. M. Tam (2005). "Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach." *Cement and Concrete Research* 35(6): 1195-1203.

¹⁹⁶ González-Fonteboa, B. and F. Martínez-Abella (2008). "Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties." *Building and Environment* 43(4): 429-437.

¹⁹⁷ Etxeberria, M., E. Vázquez, et al. (2007). "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete." *Cement and Concrete Research* 37(5): 735-742.

¹⁹⁸ Debied, F. and S. Kenai (2008). "The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete." *Construction and Building Materials* 22(5): 886-893.

¹⁹⁹ Katz, A. (2003). "Properties of concrete made whit recycled aggregate from partially hydrated old concrete." *Cement and Concrete Research* 33 (5): 703-711.

²⁰⁰ Tam, V. W. Y., C. M. Tam, et al. (2007). "Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches." *Resources, Conservation and Recycling* 50(1): 82-101.

Las limitaciones a la absorción del árido grueso reciclado de hormigón varían en función de las referencias y normativa consultadas, diferenciando los más restrictivos con valores entre un 5-7% (NBR 15116 2005; JIS A 5022 2006; JIS A 5023 2007)^{201 202 203} (EHE08)²⁰⁴, y los más tolerantes, con valores entre el 9-10%, mientras que para los áridos reciclados cerámicos la mayoría de las normas coinciden en el 20%, como valor máximo. Las recomendaciones para el árido mixto en su fracción gruesa van del 8% (Sagoe-Crentsil and Brown 1998)²⁰⁵, al 20% máximo (NB 26 2003)²⁰⁶.

Si se comparan los valores de absorción de agua que aparecen en la bibliografía consultada con respecto a la limitación establecida en la regulación técnica, se puede afirmar que la absorción es una de las propiedades físicas más importante en los áridos reciclados. Además, la absorción es una propiedad crítica cuando se utilizan áridos reciclados en la fabricación de morteros, ya que influyen en su trabajabilidad y en sus prestaciones mecánicas, al quedar huecos en el interior del material que disminuyen la resistencia a compresión.

Existen estudios que afirman que su disposición en la masa o su reactividad inducen mecanismos de reacción y capilaridad capaces de atenuar, e incluso eliminar, los efectos perniciosos que de la elevada

²⁰¹ NBR 15116 (2005). Norma Brasileña NBR 15116. Agregados reciclados de residuos sólidos de construcción civil. Utilização em pavimentação e preparo de concrete sem função estrutural.

²⁰² JIS A 5022 (2006). JIS A 5022. Recycled aggregate for concrete class M. J. S. Association. Tokio, Japan.

²⁰³ JIS A 5023 (2007). JIS A 5023. Recycled aggregate for concrete class L. J. S. Association. Tokio, Japan.

²⁰⁴ Ministerio de Fomento (2008). "Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08."

²⁰⁵ Sagoe-Crentsil, K. and T. Brown (1998). Guide for Specification of Recycled Concrete Aggregates (RCA) for Concrete Production. CSIRO, Building, Construction and Engineering. Victoria, Australia.

²⁰⁶ NB 26 (2003). NB 26. Recycling of concrete and masonry for production of concrete.

absorción puede provocar en las resistencias (Etxeberria, Vázquez et al. 2007)²⁰⁷.

En la Tabla 3.19 se representan los valores de la absorción de la fracción fina de los áridos reciclados según su composición de los estudios analizados.

ABSORCIÓN EN LA FRACCIÓN FINA (%)			
Referencias bibliográficas	ARH	ARM	ARC
(Barbudo, Agrela et al. 2012) ²⁰⁸		4,2-15,2	
(Calvo Pérez, Parra y Alfaro et al. 2002) ²⁰⁹		3,2-4	
(Chen, Yen et al. 2003) ²¹⁰		7,22-10,37	
(Corinaldesi 2009) ²¹¹		10	
(Dapena, Alaejos et al. 2011) ²¹²		5,92	
(Deshpande and Kulkarni 2011) ²¹³		8,52	
(Evangelista and de Brito 2007) ²¹⁴		13,1	
(Gómez Sobreron 2002) ²¹⁵		8	

Tabla 3.19: Absorción de la fracción fina según diversos autores.

²⁰⁷ Etxeberria, M., E. Vázquez, A. Marí and M. Barra (2007). "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete." *Cement and Concrete Research* 37(5): 735-742

²⁰⁸ Barbudo, A., F. Agrela, et al. (2012). "Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications." *Construction and Building Materials* 28(1): 129-138.

²⁰⁹ Calvo Pérez, B., J. L. Parra y Alfaro, et al. (2002). "Áridos reciclados para hormigones y morteros. Caracterización mineralógica y química."

²¹⁰ Chen, H.-J., T. Yen, et al. (2003). "Use of building rubbles as recycled aggregates." *Cement and Concrete Research* 33(1): 125-132.

²¹¹ Corinaldesi, V. (2009). "Mechanical behavior of masonry assemblages manufactured with recycled-aggregate mortars." *Cement and Concrete Composites* 31(7): 505-510.

²¹² Dapena, E., P. Alaejos, et al. (2011). "Effect of Recycled Sand Content on Characteristics of Mortars and Concretes." *Journal of Materials in Civil Engineering* 23(4): 414-422.

²¹³ Deshpande, N. and S. S. Kulkarni (2011). "Critical analysis of Recycled aggregate and concrete with Recycled aggregate." *Applied Mechanics and Materials* 99-100: 1274-1280.

²¹⁴ Evangelista, L. and J. de Brito (2007). "Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates." *Cement and Concrete Composites* 29(5): 397-401.

²¹⁵ Gómez Sobreron, J. M. V. (2002). "Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study." *Cement and Concrete Research* 32(8): 1301-1311.

ABSORCIÓN EN LA FRACCIÓN FINA (%)			
Referencias bibliográficas	ARH	ARM	ARC
(Mas, Cladera et al. 2012) ²¹⁶		4,46-7,57	
(Evangelista and de Brito 2010) ²¹⁷		13,1	
(Miranda and Selmo 2006) ²¹⁸	2		11,5
(Sim and Park 2011) ²¹⁹	6,45		
(Poon, Kou et al. 2002) ²²⁰			16,9-30,9
(Debied and Kenai 2008) ²²¹			14

Tabla 3.19: Absorción de la fracción fina según diversos autores.

3.4.4.4. Relación entre la absorción y la densidad del árido reciclado

En la Gráfica 3.4, se establecen las relaciones entre la densidad y la absorción obtenidas en la bibliografía consultada.

Se puede observar que existe una gran dispersión de resultados, pero se puede afirmar que una mayor densidad conlleva una menor absorción, tanto en las fracciones finas como gruesas.

Sí, de acuerdo con la bibliografía estudiada, se establece la misma relación diferenciando entre fracción gruesa y fina, se puede observar que esta premisa se mantiene, pero con diferentes valores.

²¹⁶ Mas, B., A. Cladera, et al. (2012). "Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use." *Construction and Building Materials* 27(1): 612-622

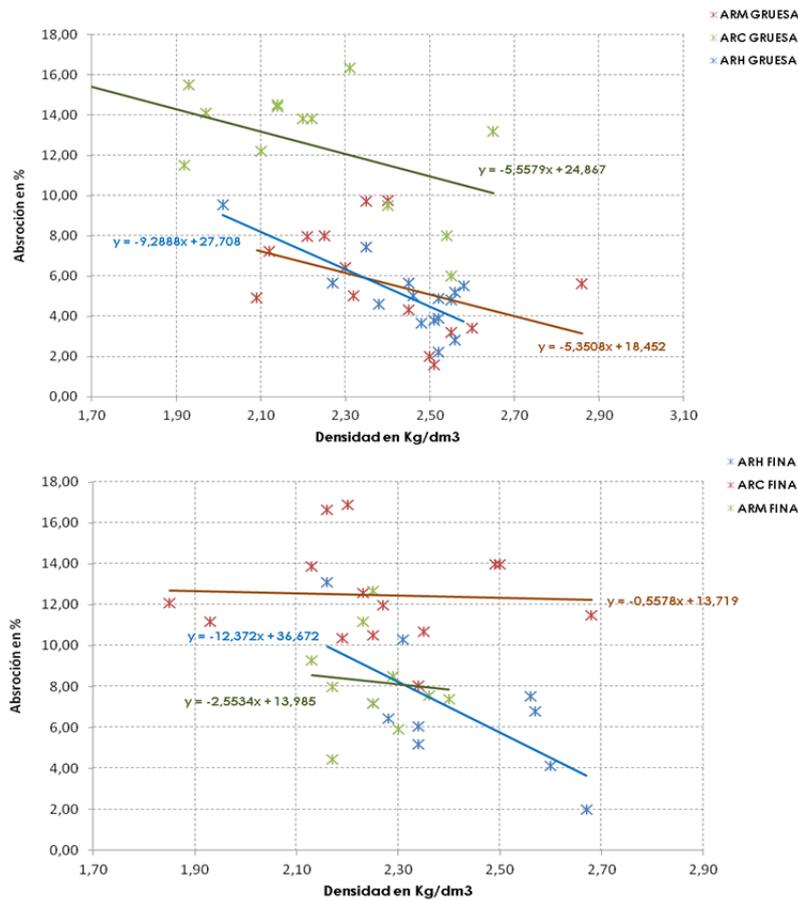
²¹⁷ Evangelista, L. and J. de Brito (2010). "Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates." *Cement and Concrete Composites* 32(1): 9-14.

²¹⁸ Miranda, L. and S. Selmo (2002). "Construction and demolition waste variability and its influence on masonry and plastering mortars properties." University of Sao Paulo. Escola Politécnica. Civil Construction Engineering Department

²¹⁹ Sim, J. and C. Park (2011). "Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate." *Waste Management* 29(9): 2352-2548

²²⁰ Poon, C. S., S. C. Kou, et al. (2002). "Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks." *Construction and Building Materials* 16(5): 281-289.

²²¹ Debied, F. and S. Kenai (2008). "The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete." *Construction and Building Materials* 22(5): 886-893.



Gráfica 3.4: Relación entre la absorción y la densidad del árido reciclado en su fracción gruesa y fina según diferentes estudios (77 datos).

3.4.4.5. Resistencia a la fragmentación

El árido reciclado presenta un elevado coeficiente de los ángulos, ya que en el ensayo se produce la pérdida de peso del árido natural, y la eliminación de todo el mortero adherido al árido (Tavakoli and Soroushian 1996; González Fonteboa 2002)^{222 223}.

²²² Tavakoli, M. and P. Soroushian (1996). "Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate." *ACI Materials Journal* 93(2): 182-190.

²²³ González Fonteboa, B. (2002). Tesis Doctoral. Hormigones con Aridos Reciclados procedentes de Demoliciones, Dosificaciones, Propiedades Mecánicas y Comportamiento Estructural a Cortante, Universidad Politécnica A Coruña.

El coeficiente de los ángeles en los áridos reciclados resulta más alto que en el árido natural. En la Tabla 3.20, se recogen algunos valores para dicho coeficiente en la bibliografía consultada. Los factores que influyen en este parámetro son la densidad, la absorción, el tamaño del árido, el tipo de procesamiento, y de la calidad del hormigón de origen.

COEFICIENTE DE LOS ÁNGELES (%)			
Ref. bibliográfica	Tamaño árido	Árido natural	Árido reciclado
(Ravindrarajah, Loo et al. 1988) ²²⁴	5-37.5 mm	16,9-18,1	28,7-40,8
(Barra 1996) ²²⁵	12-20 mm	24,7	31
(Barra de Oliveira and Vázquez 1996) ²²⁶	6-12 mm	20,4	29,5
(González Fonteboa 2002) ²²⁷	12-25 mm	27	34
(Yamato, Emoto et al. 1988) ²²⁸	AG	19,4	30,1
(Sánchez de Juan 2004) ²²⁹	4-16 mm	35,8	38,9

Tabla 3.20: Coeficiente de los Ángeles en áridos naturales y reciclados s/diversos autores.

El valor del coeficiente de los ángeles para áridos reciclados puede situarse en un rango de valores comprendido entre el 25% al 42%, dependiendo del tamaño de la partícula, la calidad del hormigón original y la

²²⁴ Sri Ravindrajah, R., Y. H. Loo, et al. (1987). "Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete." Magazine of Concrete Research 39(141): 214-220.

²²⁵ Barra, M. (1996). Estudio de la Durabilidad del Hormigón de Arido Reciclado en su aplicación como Hormigon Estructural, Universidad Politécnica de Cataluña.

²²⁶ Barra de Oliveira, M. and E. Vázquez Ramonich (1996). "The Influence of Retained Moisture in Aggregates from Recycling on the Properties of New Hardened Concrete." Waste Management 16(1-3): 113-117.

²²⁷ González Fonteboa, B. (2002). Hormigones con Aridos Reciclados procedentes de Demoliciones, Dosificaciones, Propiedades Mecánicas y Comportamiento Estructural a Cortante, Universidad Politécnica A Coruña.

²²⁸ Yamato, T., Y. Emoto, et al. (1988). "Some Properties of Recycled Aggregate Concrete." Demolition and Reuse of Concrete and Masonary. Reuse of Demolition Waste, Precedings of Second International RILEM Symposium 2: 643-651.

²²⁹ Sánchez de Juan, M. (2004). "Tesis Doctoral. "Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural".

del propio coeficiente de los ángeles del árido natural que contenga (Grupo de Trabajo 2/5 "Hormigón Reciclado" 2006)²³⁰.

En las fracciones finas de árido reciclado el coeficiente de los ángeles es mayor debido, como se ha comentado, a la presencia del mortero adherido.

La Instrucción EHE-08 establece un coeficiente máximo de 40% para su aplicación en hormigones estructurales. Otros estudios realizados (Sánchez de Juan and Alaejos 2005)²³¹ determinan que la limitación del 7% en la absorción determina coeficientes de los ángeles inferiores al 40%.

No todas las normativas establecen el ensayo del coeficiente de los ángeles para evaluar la resistencia de los áridos. Así, normativas como la australiana o la de Hong Kong establecen otro tipo de ensayos.

Como se ve en la Tabla 3.21 y 3.22, el coeficiente de los ángeles oscila para la fracción gruesa entre 29-38% para los áridos reciclados gruesos de hormigón, ente 30-60% para los áridos cerámicos y entre 30-41% para los áridos mixtos. La fracción fina presenta valores entre 40-48% para los áridos reciclados de hormigón y entre 28,3-30,4% para los áridos reciclados mixtos.

COEFICIENTE DE LOS ÁNGELES (%)						
	Fracción gruesa			Fracción fina		
Referencia bibliográfica	ARH	ARC	ARM	ARH	ARC	ARM
(Barbudo, Agrela et al. 2012) ²³²	32-34					

Tabla 3.21: Coeficiente de los Ángeles según tipos de áridos y estudios consultados.

²³⁰ Grupo de Trabajo 2/5 "Hormigón Reciclado" (2006). "Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural".

²³¹ Sanchez de Juan, M. and M. P. Alaejos (2005). Influencia del Arido Reciclado en las propiedades del Hormigón Estructural. III Congreso de ACHE. Puentes y estructuras del siglo XXI, sostenibilidad, innovación y retos de futuro, Zaragoza

²³² Barbudo, A., F. Agrela, et al. (2012). "Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications." Construction and Building Materials 28(1): 129-138.

COEFICIENTE DE LOS ÁNGELES (%)						
Referencia bibliográfica	Fracción gruesa			Fracción fina		
	ARH	ARC	ARM	ARH	ARC	ARM
(Jiménez, Agrela et al. 2011) ²³³	33-34		31-41			
(Padmini, Ramamurthy et al. 2009) ²³⁴	29-38			46-48		
(WRAP 2007) ²³⁵	29-35	48-60	30-36	40		
(Barbudo, Agrela et al. 2012) ²³⁶		30-43				
(González-Fonteboa and Martínez-Abella 2008) ²³⁷			32-41			
(Fonseca, de Brito et al. 2011) ²³⁸			40,22			
(Sánchez de Juan 2004) ²³⁹			38.9			
(Marinković, Radonjanin et al. 2010) ²⁴⁰						28,3-30,4

Tabla 3.21: Coeficiente de los Ángeles según tipos de áridos y estudios consultados.

²³³ Jimenez, J. R., F. Agrela, et al. (2011). "Estudio comparativo de los aridos reciclados de hormigón y mixtos como material para sub-base de carreteras." *Materiales de Construcción* 61 n° 302(Abril-Junio 2011): 289-302.

²³⁴ Padmini, A. K., K. Ramamurthy, et al. (2009). "Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete." *Construction and Building Materials* 23(2): 829-836.

²³⁵ WRAP (2007). *Aggregate Research Programme. Performance related approach to use of recycled aggregates.*

²³⁶ Barbudo, A., F. Agrela, et al. (2012). "Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications." *Construction and Building Materials* 28(1): 129-138.

²³⁷ González-Fonteboa, B. and F. Martínez-Abella (2008). "Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties." *Building and Environment* 43(4): 429-437.

²³⁸ Fonseca, N., J. de Brito, et al. (2011). "The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste." *Cement and Concrete Composites* 33(6): 637-643.

²³⁹ Sánchez de Juan, M. (2004). "Tesis Doctoral. "Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural".

²⁴⁰ Marinković, S., V. Radonjanin, et al. (2010). "Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete." *Waste Management* 30(11): 2255-2264.

3.4.4.6. Mortero adherido

La principal diferencia entre los áridos reciclados y los naturales es la cantidad de mortero adherido que incorporan a las mezclas, debido al hormigón del que proceden.

El mortero adherido a los áridos es el causante de la variabilidad de las propiedades de los morteros u hormigones fabricados con ellos. Este mortero adherido afecta negativamente al módulo de elasticidad del hormigón o mortero, a su retracción, fluencia y durabilidad, como consecuencia de la menor densidad y mayor absorción de los áridos reciclados frente a los áridos naturales (Ryu 2002; Otsuki, Miyazato et al. 2003)^{241 242}. Cuanto mayor sea el contenido de mortero adherido que presenten los áridos reciclados, más variaciones presentarán en sus propiedades los morteros u hormigones realizados con ellos. El porcentaje de mortero adherido depende de la relación agua-cemento del hormigón de origen, presentando menores valores con relaciones altas (menores resistencias). Otra de las diferencias tiene lugar en la zona de cambio entre el mortero y el árido (Figura 3.12) ya que en los morteros u hormigones fabricados con áridos naturales únicamente existe una interfase con estas características, mientras que en los fabricados con áridos reciclados son dos las zonas de cambio, una entre el árido natural y el mortero y una segunda entre el árido reciclado y el mortero nuevo (WRAP 2007)²³⁵.

Algunos investigadores consideran la antigua zona de transición, como una zona débil (Otsuki, Miyazato et al. 2003; González-Fonteboia and Martínez-Abella 2008)^{242 237}, debido a la presencia de poros y grietas en el árido reciclado que pueden contener un alto contenido en agua y afectar a la antigua interfase. La interfase entre la pasta nueva y el árido reciclado puede promover la formación de un mayor contenido en hidróxido cálcico ($\text{Ca}(\text{OH})_2$),

²⁴¹ Ryu, J. S. (2002). "An experimental study on the effect of recycled aggregate on concrete properties." *Magazine of Concrete Research* 54(1): 7-12.

²⁴² Otsuki, N., S. Miyazato, et al. (2003). "Influence of Recycled Aggregate on Interfacial Transition Zone, Strength, Chloride Penetration and Carbonation of Concrete." *Journal of Materials in Civil Engineering* 15(5): 443-451.

CH o Portlandita) (Ulloa Mayorga 2012)²⁴³. Estos cristales de CH tienden a formarse en los poros del árido reciclado del mortero adherido antiguo, según estudios realizados (Kong, Lei et al. 2010)²⁴⁴, y cuyas micrografías se muestran en la Figura 3.12.

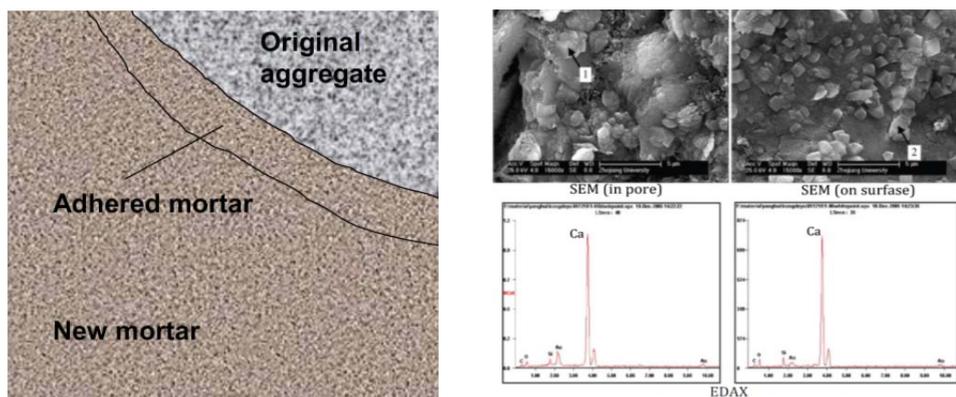


Figura 3.12: Zonas de cambio entre el mortero adherido y el árido reciclado (derecha) (WRAP 2007)²⁴⁵. Cristales de hidróxido de calcio formados en el mortero adherido del árido reciclado (izquierda) (Kong, Lei et al. 2010)²⁴⁴.

La variación en los resultados obtenidos en los estudios realizados para el análisis de la cantidad de mortero adherido al árido es importante, ya que no existe un procedimiento normalizado. Además, los resultados tampoco se pueden considerar homogéneos al utilizar procedimientos de análisis diferentes.

Así, hay estudios donde los índices de mortero adherido son del 60% para la fracción 4-8 mm, y del 40% para la fracción 16-32 mm (Hansen 1986)²⁴⁶. Otros observan un 20% de mortero adherido en la fracción 20-30 mm y un

²⁴³ Ulloa Mayorga, V. A. (2012). Durabilidad de hormigones armados, con árido reciclado: Una evaluación de la corrosión en un ambiente marino, Unviersitar Politecnica de Valencia

²⁴⁴ Kong, D., T. Lei, et al. (2010). "Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete." *Construction and Building Materials* 24(5): 701-708.

²⁴⁵ WRAP (2007). Agreggate Research Programme. Performance related approach to use of recycled aggregates.

²⁴⁶ Hansen, T. C. (1986). "Recycled aggregates adn recycled concrete." RILEM Second state of the arte report developments.

aumento hasta el 45-65% para fracciones <0,3 mm (Ravindrarajah and Tam 1988)²⁴⁷. Estudios más recientes (Vázquez Ramonich and Barra de Oliveira 2002)²⁴⁸, determinan que el contenido de mortero para la fracción 10-20 mm alcanzó el 40,5% y del 49,5% para la fracción 5-10 mm, algo más altos que los valores determinados en otro estudio español (Sánchez de Juan 2004)²⁴⁹, con valores del 30,8% para la fracción 4-16 mm.

Suelen emplearse métodos que tratan de eliminarlo de la superficie del árido original mediante una diferencia entre pesadas, antes y después de su eliminación, estableciendo el porcentaje en peso del mortero adherido. Otro método de evaluarlo consiste en fabricar un hormigón o mortero con los áridos reciclados y con el cemento coloreado. Una vez endurecido se corta en rebanadas y se pulen sus caras, realizándose una evaluación por volumen entre el mortero nuevo y el adherido, por la diferente coloración entre ambos (RILEM-International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures 2006)²⁵⁰.

Para disminuir el contenido del mortero adherido y conseguir un árido de mayor calidad se utilizan procesos sucesivos de trituración. Así, por ejemplo, con un proceso de trituración mediante machacadoras de impacto, el árido grueso puede contener entre un 35-40% de mortero adherido. Si éste árido le sometemos a una segunda trituración mediante machacadora de rodillo, este porcentaje disminuye hasta el 17-26%. Mediante un tercer proceso de trituración, también con machacadora de rodillo, se puede conseguir un árido

²⁴⁷ Ravindrarajah, R. S. and C. M. Tam (1988). Methods of Improving the Quality of Recycled Aggregate Concrete. RILEM

²⁴⁸ Vázquez Ramonich, E. and M. Barra de Oliveira (2002). Hormigón de áridos reciclados : Retracción. V Seminario Desenvolvimento Sustentavel e a Reciclagem a Construcao Civil. Brasil: 7-14.

²⁴⁹ Sánchez de Juan, M. (2004). "Tesis Doctoral. "Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural".

²⁵⁰ RILEM - International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures (2006). "Demolición y Reciclajes del concreto y la mampostería, especificaciones para concreto con agregados reciclados."

con un porcentaje de mortero adherido entre el 7-10%. (Yagishita, Sano et al. 1993)²⁵¹.

Los procedimientos de ensayo que determinan el contenido en pasta o mortero adherido que se han encontrado en la bibliografía son para la fracción gruesa y mediante choque térmico (Barra 1996)²⁵² o mediante la fabricación de un nuevo hormigón con árido reciclado y con cemento coloreado (Hansen and Narud 1983; Vázquez Ramonich and Barra de Oliveira 2002)^{253 254}, o por tratamiento térmico (Nagataki, Gokce et al. 2000; Medina, Sánchez de Rojas et al. 2011)^{255 256}.

3.4.4.7. Contenido en finos

El contenido en finos, es decir, las partículas de menos de 0,063 mm se limitan sobre todo en la fracción gruesa y no solo en cuanto a su cantidad sino también a su calidad. Desde el punto de vista granulométrico, una cantidad adecuada de finos y de calidad (de naturaleza no arcillosa) mejorará la docilidad y la cohesión en estado fresco y la impermeabilidad y durabilidad en estado endurecido, sin necesidad de agua ni cemento.

Casi todas las normativas limitan la cantidad adecuada de finos. En el árido grueso éstas van del 1% de la Norma JIS A 5021 al 10% de la Norma NBR. En el árido fino la tolerancia es mayor, con límites del 6% de la EHE-08 al 20% de la Norma NBR 15116.

²⁵¹ Yagishita, F., M. Sano, et al. (1993). Behaviour of Reinforced Concrete Beams Containing Recycled Coarse Aggregate. . Third International RILEM Symposium.

²⁵² Barra, M. (1996). Estudio de la Durabilidad del Hormigón de Arido Reciclado en su aplicación como Hormigon Estructural, Universidad Politécnica de Cataluña.

²⁵³ Hansen, T. C. and H. Narud (1983). "Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate." Concrete International 5(1): 79-83.

²⁵⁴ Vázquez Ramonich, E. and M. Barra de Oliveira (2002). Hormigón de áridos reciclados : Retracción. V Seminario Desenvolvimento Sustentavel e a Reciclagem a Construcao Civil. Brasil: 7-14.

²⁵⁵ Nagataki, S., A. Gokce, et al. (2000). Effects of recycled aggregate characteristics on the performance parameters of recycled aggregate concrete. Proceedings of the Fifth Canmet/ACI International Conference on Durability of Concrete. Barcelona: 51-71.

²⁵⁶ Medina, C., M. I. Sánchez de Rojas, et al. (2011). "Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes." Cement and Concrete Composites 13(8): 439-447.

En la Tabla 3.23, se muestran el contenido en finos en la fracción gruesa y fina según el tipo de árido reciclado según estudios consultados.

CONTENIDO EN FINOS (%)						
Referencia Bibliográfica	Fracción gruesa			Fracción fina		
	ARH	ARC	ARM	ARH	ARC	ARM
(González-Fonteboa and Martínez-Abella 2008) ²⁵⁷			0,1-0,2			8,8
(Martín-Morales, Zamorano et al. 2011) ²⁵⁸			1,17			4,1
(Alaejos and Sánchez de Juan 2004) ²⁵⁹			0,28-1,14			
(Marinković, Radonjanin et al. 2010) ²⁶⁰			0,29-0,36			
(Deshpande and Kulkarni 2011) ²⁶¹						3,6
(Zega and Di Maio 2011) ²⁶²						4,0
(Corinaldesi and Moriconi 2009) ²⁶³						0,5
(Miranda and Selmo 2006) ²⁶⁴				33-46		

Tabla 3.22: Contenido en finos según tipos de áridos y estudios consultados.

²⁵⁷ González-Fonteboa, B. and F. Martínez-Abella (2008). "Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties." *Building and Environment* 43(4): 429-437.

²⁵⁸ Martín-Morales, M., M. Zamorano, et al. (2011). "Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08." *Construction and Building Materials* 25(2): 742-748.

²⁵⁹ Alaejos, M. P. and M. Sanchez de Juan (2004). Utilization of recycled concrete aggregate for structural concrete. Conference on the use of recycled materials in building and structures. RILEM. Barcelona

²⁶⁰ Marinković, S., V. Radonjanin, et al. (2010). "Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete." *Waste Management* 30(11): 2255-2264.

²⁶¹ Deshpande, N. and S. S. Kulkarni (2011). "Critical analysis of Recycled aggregate and concrete with Recycled aggregate." *Applied Mechanics and Materials* 99-100: 1274-1280

²⁶² Zega, C. J. and Á. A. Di Maio (2011). "Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements." *Waste Management* 31(11): 2336-2340.

²⁶³ Corinaldesi, V. and G. Moriconi (2009). "Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate." *Construction and Building Materials* 23(1): 289-294.

²⁶⁴ Miranda, L. and S. Selmo (2006). "CDW recycled aggregate renderings: Part I - Analysis of the effect of materials finer than 75 µm under accelerated aging performance " *Construction and Building Materials* 20(9): 625-633.

No obstante, ajustar la granulometría del árido a la normativa no suele ser problemático, siendo suficiente con el diseño de un proceso de producción que permita eliminar la cantidad de partículas no deseadas en el árido reciclado (Tam and Le 2007; Corinaldesi and Moriconi 2009)^{265 266}.

3.4.4.8. Módulo de finura

El módulo de finura se obtiene a partir del porcentaje retenido y acumulado de material en los tamices 0,125-0,25-0,5-1-2-4-8-16-31,5 y 63 dividido entre 100. Este módulo nos da una idea del tamaño que posee el árido según su tamaño máximo (Jiménez Montoya, García Meseguer et al. 2000)²⁶⁷, de forma que cuanto más bajo sea, más pequeño será el conjunto de los granos del árido.

El módulo de finura no está limitado por ninguna norma, pero existen bastantes estudios referidos que se muestran en la Tabla 3.24.

Como se puede observar, los tamaños gruesos presentan valores superiores al óptimo, mientras que los áridos finos presentan valores similares al módulo ideal.

No obstante el módulo de finura no representa un hándicap para su utilización, ya que se pueden combinar distintas fracciones para corregir su tamaño y distribución granulométrica, de forma que el módulo de finura resultante sea lo más parecido al óptimo.

²⁶⁵ Tam, V. W. Y. and K. N. Le (2007). "Aggregate testing using 2nd-, 7th- and 10th-order interpolation polynomials." *Resources, Conservation and Recycling* 52(1): 39-57.

²⁶⁶ Corinaldesi, V. and G. Moriconi (2009). "Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate." *Construction and Building Materials* 23(1): 289-294

²⁶⁷ Jiménez Montoya, P., A. García Meseguer, and F. Morán Cabré, Hormigón armado, ed. E.G.G. S.A.2000, Barcelona.

MÓDULO DE FINURA							
Refer. Bibliográfica	Tam.	Fracción gruesa			Fracción fina		
		Mín.	Máx.	Opt.	Mín.	Máx.	Opt.
(Bairagi, Ravande et al. 1993) ²⁶⁸	20	6,57	7,2	5,14			
(Alaejos and Sánchez de Juan 2004) ²⁶⁹	16	6,67	7,2	4,8			
(Medina, Sánchez de Rojas et al. 2011) ²⁷⁰	12,5	6,17	6,17	4,51			
(Barra de Oliveira and Vázquez 1996) ²⁷¹	10	6	6,2	4,22			
(Barra de Oliveira and Vázquez 1996) ²⁷¹	5				3,13	5,81	3,33
(Miranda and Selmo 2006) ²⁷²	4				1,78	3,98	3,01
(Miranda and Selmo 2006) ²⁷²	0,075				0,74	0,74	0,083

Tabla 3.23: Módulos de finura de los áridos reciclados según diversos autores.

3.4.5. Composición química de los áridos reciclados

En los estudios consultados, la determinación de la composición química de los áridos se realiza para establecer la clasificación genérica de los áridos reciclados, además de analizar cómo afectan sustancias tales como los sulfatos o los cloruros presentes en ellos.

²⁶⁸ Bairagi, N. K., K. Ravande, et al. (1993). "Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates." *Resources, Conservation and Recycling* 9(1-2): 109-126

²⁶⁹ Alaejos, M. P. and M. Sanchez de Juan (2004). Utilization of recycled concrete aggregate for structural concrete. Conference on the use of recycled materials in building and structures. RILEM. Barcelona

²⁷⁰ Medina, C., M.I. Sánchez de Rojas, and M. Frías, Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes. *Cement and Concrete Composites*, 2011. 13(8): p. 439-447.

²⁷¹ Barra de Oliveira, M. and E. Vazquez, The influence of retained moisture in aggregates form recycling on the properties of new hardened concrete. *Waste Management*, 1996. 16(1-3): p. 113-117.

²⁷² Miranda, L. and S. Selmo, CDW recycled aggregate renderings: Part I - Analysis of the effect of materials finer than 75 µm under accelerated again performance *Construction and Building Materials*, 2006. 20(9): p. 625-633.

La determinación de la composición en óxidos del árido reciclado se puede considerar como un camino para caracterizarlos, de igual modo que se hace con la determinación de las propiedades físicas, como la densidad o la absorción, coeficiente de los ángulos, etc. (Bustillo 2010)²⁷³. Esta composición global estará en función de la naturaleza inicial del residuo, ya que es muy diferente para la composición de los óxidos mayoritarios que el escombros proceda de hormigones realizados con áridos de cuarcita o calcárea, a que su origen sea cerámico. En el primer caso, la composición de óxidos reflejará la típica de la cuarcita, formada por sílice, o de una caliza; mientras que en el segundo, dependerá del tipo de arcilla utilizado en la fabricación del material cerámico.

En la Tabla 3.25 se muestra la composición en óxidos de diversos áridos reciclados. En el caso de la muestra A de residuos de materiales cerámicos (WRAP 2007)²⁷⁴, y las muestras B (Limbachiya, Marrocchino et al. 2007)²⁷⁵ y en la C (WRAP 2007)²⁷⁴, por residuos de presencia mayoritaria de hormigón.

COMPOSICIÓN DE LOS ÓXIDOS (%)							
Óxido	A	B	C	Óxido	A	B	C
SiO ₂	64,6	68,43	58,9	TiO ₂	0,7	0,3	0,9
Al ₂ O ₃	11,6	5,49	14,3	K ₂ O	2	0,62	2,3
Fe ₂ O ₃	4,2	2,4	5,0	Na ₂ O	1,0	0,94	1,5
CaO	9,5	11,19	7,6	P ₂ O ₅	0,3	0,1	0,2
MgO	1,4	2,84	3,2	SO ₃	0,0	0,17	0,6
MnO	0,1	0,5	0,1				

Tabla 3.24: Composición en óxidos de muestras de áridos reciclados.

²⁷³ Bustillo, M., Manual de RCD y áridos reciclados 2010. Fueyo Editores.

²⁷⁴ WRAP (2007). Aggregate Research Programme. Performance related approach to use of recycled aggregates

²⁷⁵ Limbachiya, M. C., E. Marrocchino, et al. (2007). "Chemical-mineralogical characterization of coarse recycled concrete aggregate." Waste Management 27(2): 201-208.

3.4.6. Propiedades químicas de los áridos reciclados

Los requisitos químicos que los áridos reciclados deben poseer para poder utilizarlos en la fabricación de morteros y hormigones se refiere principalmente al contenido en cloruros y sulfatos, dado que éstos pueden favorecer los procesos de corrosión de las armaduras y la descomposición del hormigón endurecido. También se estudia la posible presencia de partículas perjudiciales para el fraguado y endurecido del hormigón y el contenido de materia orgánica.

REQUISITOS QUÍMICOS DEL ÁRIDO RECICLADO				
Requisito	Tipo	Límites %	Normativa menos restrictiva	Normativa más restrictiva
Sulfatos solubles en agua %	ARH	≤ 0,2-1	RILEM; NBR 15.116	LNEC E 471
	ARC	≤ 1	RILEM (Type I)	
	ARM	≤ 0,2-1	NBR 15.116	LNEC E 471
Sulfatos solubles en ácido %	ARH	≤ 0,8-1	BS 8500; CUR	EHE08; LNEC E 471
	ARC	≤ 0,8- 1	BS 8500; CUR	DIN 4226
	ARM	≤ 0,8- 1	OT 70085	DIN 4226; LNEC E 471
Sulfatos totales %	ARH	≤ 1	EHE08; prEN 12620; LNEC E 471	
	ARC	≤ 1	BRE Digest 433	
	ARM	≤ 1	NTC; LNEC E 471; BRE Digest 433; SIA 2030	
Cloruros solubles	ARH	≤ 0,03-1	NBR 15.116	EHE08
Cloruros solubles en ácido %	ARH	≤0,03-0,25	DG/TJ07/008	OT 70085
	ARC	≤ 0,04-0,06	PTV 406	DIN 4226
	ARM	≤ 0,04-1	NBR 15.116	DIN 4226
Cloruros totales %	ARH	≤0,03-0,15	EHE08	EHE08; SIA 2030
Partículas ligeras %	ARH	≤ 0,2-1	EHE08; LNEC E 471	CUR; NB 26
	ARC	≤ 1	PTV 406; RILEM; BS 8500	
	ARM	≤ 1	LNEC E 471	
Materia orgánica %	ARH	≤ 0,1-2	NBR 15.116	CUR; NEN 5905
	ARC	≤ 0,5-1	RYLEM; CUR	PTV 406
	ARM	≤ 0,15- 2	NEC E 471; NBR 15.116	CSIRO
Terrones arcilla %	ARH	≤ 0,2- 2	NBR 15.116	KS F 2573
	ARC	≤ 2	NBR 15.116	

Tabla 3.25: Requisitos químicos según Normas y Guías consultadas.

La mayoría de las normas consultadas contemplan limitaciones en cuanto al contenido en sulfatos y cloruros totales y solubles en agua o en ácido. Los procedimientos se realizan fundamentalmente sobre la fracción fina de los áridos. Resultan sorprendentes normativas como la Norma Coreana (KS F 2573 2011) que no contempla ningún requisito químico, mientras que otras como la Norma Japonesa (JIS A 5021, JIS a 5022 2006, JIS A 5023 2007) y la Norma Australiana (Sagoe-Crentsil 1998)²⁷⁶, limitan exclusivamente los cloruros totales.

3.4.6.1. Contenido en sulfatos

La cantidad de sulfatos contenida en los áridos reciclados puede ser importante, ya que al contenido propio del árido natural se le añade el que acompaña al mortero adherido, y en el caso de áridos procedentes de edificación a la presencia de yeso como contaminante.

La presencia de sulfatos en los áridos reciclados es perjudicial, ya que puede formar ettringita (sulfoaluminato cálcico) que al combinarse con el aluminato tricálcico hidratado del cemento puede provocar reacciones expansivas, que afectan a la durabilidad de los morteros u hormigones. Otra posible transformación es la del hidróxido de calcio libre o liberado en la hidratación del cemento, que conlleva, igualmente, un aumento de volumen (Fernández Cánovas 1989)²⁷⁷.

En este sentido, el trabajo experimental realizado por el IHOBE (IHOBE 2011)²⁷⁸ determina la alta solubilidad de los sulfatos de los áridos reciclados confirmada mediante estudio termogravimétrico, en el que se detecta la presencia de yeso, ettringita y portlandita. También se manifiesta una alta correlación entre el contenido en yeso granular y el contenido en sulfatos.

²⁷⁶ Sagoe-Crentsil, K. and T. Brown (1998). Guide for Specification of Recycled Concrete Aggregates (RCA) for Concrete Production. CSIRO, Building, Construction and Engineering. Victoria, Australia.

²⁷⁷ Fernández Cánovas, M., Hormigon 1989: ETS de Ingenieros de Caminos.

²⁷⁸ IHOBE (2011). Usos de áridos reciclados mixtos procedentes de residuos de construcción y demolición. I. S. P. d. G. Ambiental.

Si se limita el contenido en compuestos totales de azufre en vez de los sulfatos solubles en agua, se reducen considerablemente el riesgo de sufrir expansiones (Kasai 1994; RILEM 1994)^{279 280}.

De los estudios consultados, se puede concluir que el contenido en sulfatos en sus diferentes formas es muy variable, hallándose valores para los compuestos totales de la fracción gruesa que oscilan entre el 0,003% y el 6%.

Para los sulfatos solubles en ácido, éstos varían entre 0,1% al 6,19%, mientras que para los sulfatos soluble en agua los valores oscilan entre 0,01% y el 3,93%.

El contenido en sulfatos para la fracción fina también es muy variable, con valores entre 0,39% al 3,66% para los compuestos totales, entre 0,33% al 3,66% para los sulfatos solubles en ácido; y entre 0,0% al 1,52% para el contenido en sulfatos solubles en agua. Los valores más altos corresponden a los áridos reciclados más finos (Sánchez de Juan 2004; Soutsos, Tang et al. 2011)^{281 282}.

Existen estudios donde se recomienda tamizar los RCD mixtos ante de su trituración, para reducir el contenido en compuestos de azufre, no teniendo ningún efecto sobre la calidad de los áridos, si estos proceden de hormigón (Jiménez, Agrela et al. 2011)²⁸³.

En las Tablas 3.26 y 3.27 se muestran los valores obtenidos de los diferentes estudios consultados.

²⁷⁹ Kasai, Y. (1994). *Guidelines and the Present State of the Reuse of Demolished Concrete in Japan*. London, E&FN Spon.

²⁸⁰ RILEM (1994). "Specifications for concrete with recycled aggregates." *Materials and Structures* 27(9): 557-559.

²⁸¹ Sánchez de Juan, M. (2004). "Tesis Doctoral. "Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural".

²⁸² Soutsos, M. N., K. Tang, et al. (2011). "Concrete building blocks made with recycled demolition aggregate." *Construction and Building Materials* 25(2): 726-735.

²⁸³ Agrela, F., et al., Limiting properties in the characterization of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete. *Construction and Building Materials* 25 (10), 2011. 25(10): p. 3950-3955.

CONTENIDO EN SULFATOS SOLUBLES EN AGUA (%)						
Ref. bibliográfica	Fracción gruesa			Fracción fina		
	ARH	ARC	ARM	ARH	ARC	ARM
(Barbudo, Agrela et al. 2012) ²⁸⁴	0,25-0,38		0,01-3,93			
(Mas, Cladera et al. 2012) ²⁸⁵			0,13-0,15			0,13-0,14
(Calvo Pérez, Parra y Alfaro et al. 2002) ²⁸⁶						0,00
(Martín-Morales, Zamorano et al. 2011) ²⁸⁷						1,52

CONTENIDO EN SULFATOS SOLUBLES EN ÁCIDO (%)						
(Barbudo, Agrela et al. 2012) ²⁸⁴	0,47-0,8	0,73-6,19	0,32-2,67			
(WRAP 2007) ²⁸⁸	0,4-0,5	0,1-1,9	0,5			
(González-Fonteboa and Martínez-Abella 2008) ²⁸⁹			0,18-0,55			
(Agrela, Sanchez de Juan et al. 2011) ²⁹⁰	0,33-0,44	0,56-4,45	0,04-1,71			
(Alaejos and Sánchez de Juan 2004) ²⁹¹			0,1-0,42			
(Mas, Cladera et al. 2012) ²⁸⁵			2,21-6,98			2,90-3,66
(Calvo Pérez, Parra y Alfaro et al. 2002) ²⁸⁶						0,33-0,38

Tabla 3.26: Contenido en sulfatos solubles en agua y ácido según estudios consultados.

²⁸⁴ Barbudo, A., et al., Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications. *Construction and Building Materials*, 2012. 28(1): p. 129-138.

²⁸⁵ Mas, B., et al., Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use. *Construction and Building Materials*, 2012. 27(1): p. 612-622.

²⁸⁶ Calvo Pérez, B., et al., Áridos reciclados para hormigones y morteros. *Caracterización mineralógica y química*. 2002.

²⁸⁷ Martín-Morales, M., et al., Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08. *Construction and Building Materials*, 2011. 25(2): p. 742-748.

²⁸⁸ WRAP, Aggregate Research Program. Performance related approach to use of recycled aggregates, WRAP, Editor 2007.

²⁸⁹ González-Fonteboa, B. and F. Martínez-Abella, Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. *Materials and mechanical properties*. *Building and Environment*, 2008. 43(4): p. 429-437.

²⁹⁰ Agrela, F., M. Sanchez de Juan, et al. (2011). "Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete." *Construction and Building Materials* 25 (10) 25(10): 3950-3955.

²⁹¹ Alaejos, M.P. and M. Sanchez de Juan, Utilization of recycled concrete aggregate for structural concrete, in *Conference on the use of recycled materials in building and structures*, RILEM, Editor 2004: Barcelona.

CONTENIDO EN SULFATOS SOLUBLES TOTALES (%)						
Ref. bibliográfica	Fracción gruesa			Fracción fina		
	ARH	ARC	ARM	ARH	ARC	ARM
(Jiménez, Agrela et al. 2011) ²⁹²	0,6-0,8		0,6-6			
(González-Fonteboa and Martínez-Abella 2008) ²⁸⁹			0,55			
(Mas, Cladera et al. 2012) ²⁸⁵			0,29-2,45			2,39-3,66
(Agrela, Sanchez de Juan et al. 2011) ²⁹⁰	0,15-1,9					
(Tam and Le 2007) ²⁹³			0,003			
(Alaejos and Sánchez de Juan 2004) ²⁹¹			0,15-0,58			
(Calvo Pérez, Parra y Alfaro et al. 2002) ²⁸⁶						0,39-0,52

Tabla 3.27: Contenido en sulfatos totales según estudios consultados.

3.4.7. Contenido en cloruros

El ion cloruro penetra en los hormigones y moteros reaccionando químicamente con el hidróxido cálcico y con el aluminato cálcico. Estas reacciones provocan una disminución de la capa de pasivación que protege las armaduras, produciendo la corrosión en presencia de humedad.

El contenido en cloruros que pueden presentar los áridos reciclados depende de la procedencia del material base. Para áridos que proceden de hormigones con acelerantes de fraguado, los procedentes de obras marítimas o bien pavimentos expuestos a sales de deshielo, la concentración que pueden presentar es elevada (ACHE 2006; Debieb, Courard et al. 2010)²⁹⁴ ²⁹⁵.

²⁹² Jiménez, J.R., et al., Estudio comparativo de los áridos reciclados de hormigón y mixtos como material para sub-base de carreteras. *Materiales de Construcción*, 2011. 61 n° 302(Abril-Junio 2011): p. 289-302.

²⁹³ Tam, V.W.Y. and K.N. Le, Aggregate testing using 2nd-, 7th- and 10th-order interpolation polynomials. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007. 52(1): p. 39-57.

²⁹⁴ ACHE, Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. ACHE (Asociación Científico Técnica del Hormigón Estructural), 2006.

²⁹⁵ Debieb, F., et al., Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 2010. 32(6): p. 421-426.

Por este motivo, la mayoría de las normas y recomendaciones fijan límites muy estrictos para los cloruros solubles en ácido (CUR, DIN, OT, WBTC), excepto la Norma China (SCCS). Los cloruros solubles en agua son prescritos únicamente por la EHE-08 y la SIA. No obstante, la EHE-08, en su Anejo 15, recomienda realizar el ensayo para determinar el contenido en cloruros totales, ya que pueden existir cloruros que, combinados, pueden ser reactivos y atacar a las armaduras.

De los estudios consultados, se puede determinar que el contenido en cloruros solubles en ácido de la fracción gruesa de los áridos reciclados varía entre 0,0% y el 0,08% y entre 0,00% y 0,13% para los cloruros solubles en agua, siendo el contenido total comprendido entre 0,05% y 0,09%. Para la fracción fina de los áridos reciclados, el contenido en cloruros solubles en agua varía entre 0,00% y 0,053%.

CONTENIDO EN CLORUROS SOLUBLES EN TOTALES (%)						
Ref. bibliográfica	Fracción gruesa			Fracción fina		
	ARH	ARC	ARM	ARH	ARC	ARM
(González-Fontebao and Martínez-Abella 2008) ²⁹⁶			0,0056			
(Tam and Le 2007) ²⁹⁷			0,008-0,09			
(Alaejos and Sánchez de Juan 2004) ²⁹⁸			0,005			
(Müller 2004) ²⁹⁹						0,017

Tabla 3.28: Contenido de cloruros solubles totales.

²⁹⁶ González-Fontebao, B. and F. Martínez-Abella, Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties. Building and Environment, 2008. 43(4): p. 429-437.

²⁹⁷ Tam, V.W.Y. and K.N. Le, Aggregate testing using 2nd-, 7th- and 10th-order interpolation polynomials. Resources, Conservation and Recycling, 2007. 52(1): p. 39-57.

²⁹⁸ Alaejos, M.P. and M. Sanchez de Juan, Utilization of recycled concrete aggregate for structural concrete, in Conference on the use of recycled materials in building and structures, RILEM, Editor 2004: Barcelona

²⁹⁹ Müller, A., Lightweight aggregates from masonry rubble. 2004.

CONTENIDO EN CLORUROS SOLUBLES EN ÁCIDO (%)						
Ref. bibliográfica	Fracción gruesa			Fracción fina		
	ARH	ARC	ARM	ARH	ARC	ARM
(Barbudo, Agrela et al. 2012) ³⁰⁰	0,03-0,08	0,0-0,03	0,07-0,08			

CONTENIDO EN CLORUROS SOLUBLES AGUA (%)	
(WRAP 2007) ³⁰¹	0,00
(Alaejos and Sánchez de Juan 2004) ²⁹⁸	0,0006
(Mas, Cladera et al. 2012) ³⁰²	0,01-0,13 0,053
(González-Fonteboa and Martínez-Abella 2008) ²⁹⁶	0,055
(Calvo Pérez, Parra y Alfaro et al. 2002) ³⁰³	0,00
(Martín-Morales, Zamorano et al. 2011) ³⁰⁴	0,053

Tabla 3.29: Contenido en cloruros solubles en ácido y en agua según estudios consultados.

Podemos concluir que, en los estudios consultados, son pocos los que muestran valores que superan los límites establecidos por las diferentes normas o guías (ver Tabla 3.26). Algunos autores consideran adecuado someter a un proceso de inmersión en agua a los áridos reciclados para disminuir el nivel de cloruros existentes (Sánchez de Juan and Alaejos

³⁰⁰ Barbudo, A., et al., Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications. *Construction and Building Materials*, 2012. 28(1): p. 129-138.

³⁰¹ WRAP, Aggregate Research Program. Performance related approach to use of recycled aggregates, WRAP, Editor 2007.

³⁰² Mas, B., A. Cladera, et al. (2012). "Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use." *Construction and Building Materials* 27(1): 612-622.

³⁰³ Calvo Pérez, B., et al., Áridos reciclados para hormigones y morteros. Caracterización mineralógica y química. 2002.

³⁰⁴ Martín-Morales, M., et al., Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08. *Construction and Building Materials*, 2011. 25(2): p. 742-748.

2005)³⁰⁵, mejorando así la calidad del árido resultante (Debieb, Courard et al. 2009)³⁰⁶.

3.4.8. Contaminantes e impurezas

Las impurezas y contaminantes en los áridos reciclados perjudican notablemente las propiedades de los morteros y hormigones elaborados con ellos. La madera, plásticos, yesos, metales, vidrio, asfalto o la materia orgánica son los contaminantes que habitualmente acompañan a los áridos reciclados.

Estos productos son los responsables de la caída de las resistencias mecánicas, siendo el efecto mayor si los contaminantes son restos de asfalto o pinturas y menores si son restos arcillosos o de cales. Los restos de material cerámico disminuyen la resistencia a los ciclos de hielo-deshielo, y generan fenómenos de expansión cuando proceden de materiales refractarios. Los restos de vidrio son difíciles de eliminar al ser su densidad similar a la del árido y favorecen la reacción álcali-árido. La madera y el papel provocan desconchados superficiales, los fragmentos arcillosos suelen provocar retracción y los restos de yeso pueden originar ataques por sulfatos.

La presencia de uno u otro tipo de contaminante depende de la procedencia del árido reciclado, siendo inferior cuando tienen su origen en los escombros de hormigón y aumentado éstas cuando los áridos proceden de escombros de demolición (Yanagi, Nakagawa et al. 1988; Sagoe-Crentsil 1998)^{307 308}.

³⁰⁵ Sánchez de Juan, M. and M.P. Alaejos. Influencia del Árido Reciclado en las propiedades del Hormigón Estructural. in III Congreso de ACHE. Puentes y estructuras del siglo XXI, sostenibilidad, innovación y retos de futuro. 2005. Zaragoza.

³⁰⁶ Debieb, F., et al., Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 2009. 23(11): p. 3382-3387.

³⁰⁷ Yanagi, K., et al., Effect of impurities in Recycled Coarse Aggregate Upon a Few Properties of the Concrete Produced with it in Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry 1988: Japan. p. 613-623.

³⁰⁸ Sagoe-Crentsil, B., Guide Specifications for Recycled Aggregates in Concrete Construction. 1998.

Un estudio español (Agrela, Sánchez de Juan et al. 2011)³⁰⁹, realizado sobre 35 muestras de árido reciclado mixto recogidas en 13 Plantas de Reciclado, concluye que existe una gran variedad de contenido de impurezas. En la Tabla 3.30 se muestran los valores comunes de cada uno de los tipos de impurezas según la Norma UNE 933-11 (AENOR 2009)³¹⁰, de acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio.

CONTENIDO EN IMPUREZAS		
Impurezas	Rango %	Promedio %
Mx – Arcilla , tierra	0-4	0,5
Mx - Yeso	0-10	1,5
Rg - Vidrio	0-10	0,7
Otros (Madera, papel, etc.)	0-3	0,2
Impurezas totales	1-11	2,5

Tabla 3.30: Contenido en impurezas en el árido reciclado mixto (Agrela, Sanchez de Juan et al. 2011)³⁰⁹.

Del análisis se puede concluir que la impureza que se encuentra con más frecuencia en el árido reciclado mixto es el yeso.

Las limitaciones establecidas por el Anejo 15 de la EHE08, referidas a los contaminantes e impurezas en relación al peso total de la muestra, son de un 5% para el material cerámico, del 1% para las partículas ligeras, del 1% para el asfalto y del 1% para el vidrio, plásticos, metales.

3.4.8.1. Materia orgánica

El contenido en materia orgánica de los áridos reciclados puede producir el retardo o paralización del proceso de fraguado, por lo que muchas normativas limitan su contenido entre el 0,1% y el 2%.

³⁰⁹ Agrela, F., M. Sánchez de Juan, et al. (2011). "Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete." *Construction and Building Materials* 25(10): 3950-3955.

³¹⁰ AENOR (2009). UNE-EN 933-11."Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos".

Existen pocos estudios con resultados cuantitativos, con valores para la fracción gruesa del árido reciclado de hormigón entre el 0,15% y 0,95% (Barbudo, Agrela et al. 2012)³¹¹. Otros estudios (Martín-Morales, Zamorano et al. 2011)³¹² evalúan la conformidad de su contenido en base a la comparación de color respecto a una sustancia patrón según la Norma UNE 1744-1 (AENOR 2010)³¹³.

CONTENIDO EN MATERIA ORGÁNICA (%)				
Requisito	Tipo	Límites	Normativa menos restrictiva	Normativa más restrictiva
Materia orgánica %	ARH	≤ 0,1- 2	NBR 15116	CUR; NEN 5905
	ARC	≤ 0,5-1	RYLEM; CUR	PTV-406
	ARM	≤ 0,15- 2	NBR 15116; LNEC	CSIRO

Tabla 3.31: Contenido en materia orgánica según normativa y guías.

3.4.8.2. Contaminantes ligeros

Las partículas blandas y las partículas ligeras que pueden contener algunos áridos reciclados son perjudiciales, ya que pueden alterar el fraguado del hormigón, afectando su resistencia y durabilidad. Según las diferentes normas y guías consultadas sus valores oscilan entre 0,1% al 1%.

CONTENIDO EN CONTAMINANTES LIGEROS (%)				
Requisito	Tipo	Límites	Normativa menos restrictiva	Normativa más restrictiva
Partículas ligeras %	ARH	≤ 0,1-1%	EHE08; LNEC E471	CUR; NB 26
	ARC	≤ 1	PTV 404; RYLEM; BS 8500	
	ARM	≤ 1	LNEC E471	

Tabla 3.32: Contenido en contaminantes ligeros según normativa y guías.

³¹¹ Barbudo, A., F. Agrela, et al. (2012). "Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications." *Construction and Building Materials* 28(1): 129-138.

³¹² Martín-Morales, M., M. Zamorano, et al. (2011). "Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08." *Construction and Building Materials* 25(2): 742-748.

³¹³ AENOR (2010) UNE-EN 1744-1. "Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Análisis químico."

3.4.9. Pérdidas por calcinación

La pérdida por calcinación no es una especificación propia de los áridos reciclados y no está limitada por ninguna normativa, salvo la Guide Specifications for Recycled Aggregates in Concrete Construction australiana (Sagoe-Crentsil 1998)³¹⁴. Como hemos comentado anteriormente este parámetro sirve para evaluar la respuesta de los componentes de los áridos reciclados frente a altas temperaturas. En las referencias analizadas, éste oscila entre el 2,6% y el 12,9% (Sagoe-Crentsil, Brown et al. 2001; Angulo, Ulsen et al. 2004; Müller 2004)^{315 316 317}.

3.4.10. Los áridos reciclados en la normativa española

3.4.10.1. Instrucción EHE-08

La Instrucción EHE-08 ha aportado criterios de sostenibilidad en la ejecución de las estructuras de hormigón y ha incorporado nuevos hormigones, como los hormigones reciclados. En la Instrucción queda definido el concepto de hormigón reciclado como aquel hormigón fabricado con árido reciclado grueso procedente del machaqueo de residuos de hormigón. No considera la utilización de la fracción fina, ni el uso de los áridos reciclados cerámicos o mixtos. En el Anejo 13 valora muy positivamente el uso de áridos procedentes de reciclado ya que, su uso, contribuye a la sostenibilidad.

La Instrucción EHE-08 establece en su Artículo 28 los requisitos físicos, mecánicos y químicos de los áridos y en el Anejo 15 las recomendaciones para su utilización.

³¹⁴ Sagoe-Crentsil, B., Guide Specifications for Recycled Aggregates in Concrete Construction. 1998.

³¹⁵ Sagoe-Crentsil, K. K., T. Brown, et al. (2001). "Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate." *Cement and Concrete Research* 31(5): 707-712.

³¹⁶ Angulo, S. C., C. Ulsen, et al. (2004). *Characterization of Brazilian construction and demolition waste coarse recycled aggregate*. International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures. RILEM. Brazil, Publications SARL: 87-96.

³¹⁷ Müller, A., *Lightweight aggregates from masonry rubble*. 2004.

Se limita el contenido de árido grueso reciclado al 20% en peso sobre el contenido total de árido grueso utilizado en la fabricación de hormigones estructurales, justificando esta limitación para no alterar las propiedades finales del hormigón, siendo necesaria la realización de estudios específicos para porcentajes superiores. No obstante, en el Anejo 18 de hormigones no estructurales se permite la utilización del 100% de árido reciclado.

Los áridos reciclados pueden emplearse para hormigones en masa y hormigones armados de resistencias características inferiores a 40 N/mm², quedando excluidos los hormigones pretensados.

También quedan fuera de la Instrucción los hormigones fabricados con árido fino, aquellos cuyos áridos reciclados sean de naturaleza diferente a la del hormigón (cerámicos, asfáltico, etc.), o los áridos procedentes de hormigones con patologías, tales como la reacción álcali-árido, sulfatos, fuego y hormigones especiales como aluminosos, con fibras, polímeros, etc.

Fija las exigencias documentales que deben tener las partidas de árido reciclado, debiendo incluir los siguientes aspectos: naturaleza del material base, planta productora y empresa transportista, presencia de impurezas, detalles de procedencia, así como cualquier información que resulte de interés.

El tamaño mínimo permitido para áridos reciclados es de 4 mm y el porcentaje de desclasificados será menor o igual al 10%, con un contenido de partículas que pasan por el tamiz 4 mm, no superior al 5%.

Para hormigones reciclados el contenido en terrones de arcilla no será superior al 0,6%, y el del árido natural no superior al 0,15%. En caso de sustituir totalmente el árido grueso por áridos reciclados, el contenido en terrones de arcilla será inferior al 25%.

En cuanto a las condiciones físico-mecánicas se fija que el hormigón reciclado no tendrá una absorción superior al 7%, para un porcentaje inferior al 20% de árido. Adicionalmente, la absorción del árido natural será inferior al 4,5%. Si se supera el 20% la absorción no será superior al 5%.

La resistencia al desgaste en el ensayo de Los Ángeles será la misma que para los áridos naturales, con un valor máximo del 40%.

El contenido en impurezas de los áridos reciclados, referido al peso total de la muestra, será inferior al 5% para materiales cerámicos, el 1% para partículas ligeras, el 1% asfalto y el 1% de otros materiales (vidrio, plásticos, metales, etc.).

El contenido en sulfatos, cloruros y partículas blandas será el mismo que los prescritos para los áridos naturales.

3.4.10.2. GEARD

El proyecto GEARD es una iniciativa de la Asociación Española de Gestores de RCD cuyo objetivo es promover la normalización y utilización de los áridos reciclados. En este proyecto han intervenido 24 empresas de reciclaje, 4 universidades y 3 centros públicos de investigación. El resultado del proyecto es una guía de recomendaciones y fichas de uso aplicables a todos los áridos reciclados que vayan a ser utilizados como materiales de construcción.

3.4.11. Normativa de áridos reciclado en la UE

3.4.11.1. Holanda - CUR y NEN 5905

La normativa holandesa clasifica los áridos reciclados en dos tipos según sean los residuos de los que proceden (hormigón y albañilería). Se permite la utilización de los áridos reciclados gruesos y finos en la elaboración de hormigones en masa, armados e incluso pretensados, indicando que el uso de áridos finos no perjudica al hormigón.

Establece que para sustituciones del 20% de árido grueso y fino natural por las correspondientes fracciones recicladas no varían las características de los hormigones y posibilitan la sustitución del 100% para áridos reciclados de calidad. En este sentido, para contrarrestar la disminución del módulo de elasticidad y la fluencia del hormigón reciclado, proponen el aumento del 10% del espesor y altura de los elementos dimensionados.

Para compensar las diferencias de absorción entre los áridos naturales y los reciclados propone someter a los reciclados a un tratamiento de presaturación antes de agregarlos a la mezcla.

Para controlar la calidad las recomendaciones del CUR indica la necesidad de identificar el origen de los áridos reciclados, sus características y tipología.

3.4.11.2. Alemania - DIN 4226-100

Establece los requisitos que deben cumplir los áridos reciclados de densidad superior a 1500 Kg/m^3 para su uso en morteros y hormigones. De igual forma, establece el control de producción y los criterios de conformidad.

Con carácter general permite la sustitución del 5% del árido natural sin establecer restricciones, aumentando hasta un 50% si se realizan comprobaciones adicionales.

3.4.11.3. Bélgica - PTV 406

Define cinco tipos de diferentes de áridos reciclados, aunque solo permite la elaboración de hormigón con los procedentes de hormigón, albañilería o mixtos. No establece prescripciones ni limitaciones que deban cumplir los áridos reciclados, y tan solo solicita la declaración del fabricante en cuanto a los requisitos físicos, mecánicos y químicos, de acuerdo a la Norma Armonizada Europea EN 12620.

3.4.11.4. Noruega - NB 26

En la elaboración de hormigón estructural solo contempla la utilización de dos tipos de áridos reciclados de tamaño máximo 32 mm y se considera el árido reciclado como reactivo, a menos que se demuestre lo contrario.

En el caso de hormigones sometidos a humedad o hielo-deshielo ha de estudiarse la aptitud del árido reciclado, no debiéndose utilizar en estructuras sometidas a fatiga.

Los niveles de sustitución varían en función del tipo de hormigón y el ambiente de exposición entre el 0% al 30%.

3.4.11.5. Reino Unido - RILEM , BRE Digest 433 y BS 8500

El RILEM recomienda el uso del árido grueso reciclado en la elaboración de hormigón. De igual forma, indica que en los hormigones elaborados con áridos reciclados que vayan a estar expuestos a ambientes agresivos, se deberá prestar especial atención a aspectos de durabilidad, realizando ensayos de expansión, resistencia hielo-deshielo y pérdidas de peso sometido a sales fundentes.

El BRE Digest 433 considera que con sustituciones del 20% no se compromete la capacidad estructural del hormigón, pero aconseja estudiar el contenido en cloruros solubles en ácido y la reactividad del árido reciclado con los álcalis del cemento. Finalmente, propone la aplicación del árido reciclado a un uso no estructural, como la elaboración de bloques prefabricados de hormigón con áridos reciclados de buena calidad, pero eliminando la fracción fina del árido reciclado y añadiendo arena natural.

La norma BS 8500 establece las prescripciones que han de cumplir los constituyentes del hormigón, entre los que se encuentran los áridos reciclados; no permite la utilización de la fracción fina, pero si el uso de áridos reciclados cerámicos en su fracción gruesa, no limitando el porcentaje de sustitución.

3.4.11.6. Suiza - OT 70085 y SIA

La OT 70085, que establece los requerimientos exigidos al hormigón, permite la sustitución de hasta el 100%, admitiendo su uso en hormigones armados con una dosificación de cemento superior a 150 Kg/m³, para áridos reciclados de hormigón. En el caso de áridos reciclados mixtos establece su uso para hormigones de regularización, hormigones de limpieza y hormigones pobres.

La SIA permite la utilización de la fracción fina en la producción de hormigón estructural, a excepción de cuando sean necesarios requerimientos de durabilidad.

3.4.12. Otras normativas

3.4.12.1. Australia - CSIRO

En ella se establecen las especificaciones que deben tener los áridos reciclados de hormigón para su utilización en hormigones en masa y armados de uso no estructural, de resistencia inferior a 40 MPa. No permite la utilización de la fracción fina, siendo ésta compuesta por arena natural.

Las aplicaciones para los áridos reciclados gruesos de hormigón y mixtos se expresan en función a diferentes grados de exigencia en la resistencia, y con limitaciones de sustitución del 30%.

La CSIRO recomienda utilizar el árido reciclado premojado durante al menos 10 minutos, para evitar los efectos negativos debidos a la absorción.

3.4.12.2. Brasil - NBR 15116

Esta Norma recoge los requisitos que deben cumplir los áridos reciclados procedentes de la demolición de construcciones civiles, destinados a la ejecución de pavimentaciones viarias y la elaboración de hormigones no estructurales.

Propone la corrección de las granulometrías poco adecuadas de algunos áridos reciclados mediante corrección con áridos naturales. De igual forma, aconseja la utilización del árido premojado hasta un 80% de su absorción.

3.4.12.3. China - DG/TJ07/008

En ella se establecen los requisitos exigibles al árido grueso para la fabricación de hormigón, tanto estructural como no estructural.

3.4.12.4. Japón - BCSJ, JIS

La norma BCSJ no prescribe ningún tipo de exigencia a la composición de los áridos reciclados, permitiendo utilizar residuos de hormigón y cerámicos. Tampoco impide la utilización de la fracción fina, pero si limita su densidad.

Prescribe el empleo de aditivos reductores de agua para que el aire ocluido se situé entre el 3-6%.

Las normas JIS se establecen tres niveles de calidad del hormigón reciclado en función de parámetros como la resistencia, durabilidad, o realización de hormigones de limpieza, relleno o nivelación.

3.5. MORTEROS RECICLADOS

3.5.1. Introducción

Como hemos podido ver en el apartado anterior la normativa existente contempla la utilización de los áridos reciclados en la elaboración de morteros, pero ya existen diversos estudios que demuestran su calidad, comparable a la de los áridos naturales, en algunos casos.

Al no existir normativa específica, los áridos reciclados utilizados deben cumplir los mismos requisitos de los áridos naturales, lo que, en algunas ocasiones y dependiendo de sus aplicaciones, se limitan sus posibilidades.

3.5.2. Propiedades del mortero endurecido

La incorporación de áridos reciclados en los morteros influye, en general, de forma negativa en todas las propiedades del mortero endurecido.

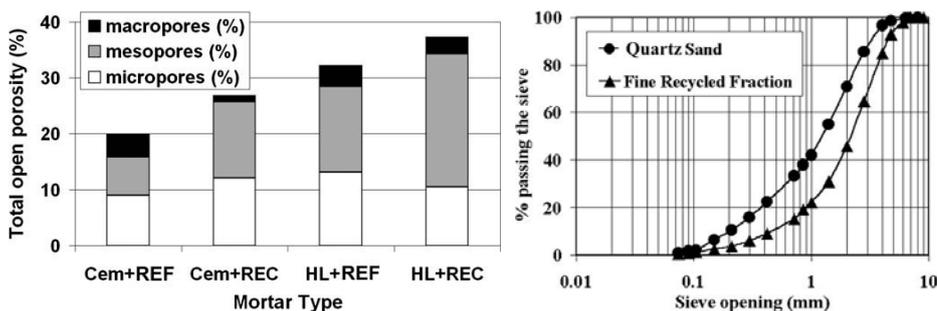
Las propiedades más importantes del mortero en estado endurecido que pueden verse afectadas por la incorporación de áridos reciclados, son las relativas a la porosidad, resistencias mecánicas, retracción y durabilidad.

3.5.3. Porosidad

La porosidad de los morteros reciclados es mayor que la de los morteros fabricados con áridos naturales, debido a que los áridos reciclados son, en general, más porosos que los naturales.

Existen estudios donde se analizan la porosidad abierta en diferentes tipos de áridos, observándose que el volumen de macroporos (poros > 1 micra) es inferior al de mesoporos (poros entre 1 y 0,1 micras) y microporos (poros < 0,1 micras).

En la Gráfica 3.5 (Corinaldesi 2009)³¹⁸, se puede observar la estructura de poros después de 60 días de curado en un mortero de cemento con árido natural (CEM+REF), en un mortero de cemento con áridos reciclados (CEM+REC), de un mortero de cal hidratada con arena natural (HL+REF), y de un mortero de cal con áridos reciclados (HL+REC). Como se puede observar, los morteros con áridos reciclados poseen una menor cantidad de macroporos que los morteros de cemento con áridos naturales, mientras que el contenido de mesoporos y microporos es superior. No obstante, la porosidad total abierta es mayor en los morteros realizados con áridos reciclados. Los morteros reciclados estaban constituidos por un 72% de hormigón, 25% materiales cerámicos y un 35% de materiales diversos (asfalto, vidrio, papel, etc.), mientras que la arena natural es de composición silícea. De igual forma, también se puede observar que la granulometría del árido reciclado presenta un contenido mayor de finos que la de la arena natural.



Gráfica 3.5: Estructura de los poros de los morteros reciclados después de 60 días de curado (izquierda). Granulometría de los áridos naturales y reciclados (derecha) (Corinaldesi 2009)³¹⁹.

3.5.4. Resistencia a compresión

La resistencia a compresión se puede considerar como la principal propiedad del mortero endurecido, siendo utilizada esta como parámetro para su clasificación y un indicio de durabilidad (ver Tabla 3.1).

³¹⁸ Corinaldesi, V., Mechanical behavior of masonry assemblages manufactured with recycled-aggregate mortars. *Cement and Concrete Composites*, 2009. 31(7): p. 505-510.

³¹⁹ Corinaldesi, V. (2009). "Mechanical behavior of masonry assemblages manufactured with recycled-aggregate mortars." *Cement and Concrete Composites* 31(7): 505-510.

Se puede afirmar que la resistencia de los morteros con áridos reciclados es menor que la de los morteros con áridos naturales, siendo esa disminución variable según la dosificación del mortero, porcentaje de sustitución del árido natural o la tipología del árido reciclado.

Hay estudios donde en los que se han analizado las resistencias mecánicas a los 7,28 y 60 días de hormigones fabricados con áridos reciclados exentos de contaminantes, con relaciones en volumen de 1:4 hasta 1:9, donde se puede observar que, a medida que se incrementa el contenidos de áridos reciclado, se produce una disminución en la resistencias mecánicas (Álvarez Cabrera, Urrutia et al. 1997)³²⁰.

RESISTENCIA A COMPRESIÓN (MPa)			
Dosificación volumen árido-cemento	7 días	28 días	60 días
1:4	4,47	11,11	14,51
1:5	3,36	9,26	11,43
1:6	2,73	6,69	9,14
1:8	1,67	4,29	5,77

Tabla 3.33: Resultados de la resistencia a compresión en función de la dosificación (Álvarez Cabrera, Urrutia et al. 1997)³²⁰.

Otros autores determinan que la resistencia a 7 días de los morteros elaborados con áridos reciclados de hormigón es superior en un 30% a la del mortero con árido natural, mientras que la resistencia a 28 días cambia, siendo mayor en un 10% la del mortero con árido natural, posiblemente debido a la morfología del árido reciclado y a la presencia de pasta adherida, ya que se puede pensar que la angulosidad del árido reciclado favorece el fraguado y la resistencias iniciales, proceso que puede verse afectado por el mortero adherido y que se refleja en una disminución de la resistencia a 28 días (Hincapié Henao and Aguja López 2003)³²¹.

³²⁰ Álvarez Cabrera, J. L., F. Urrutia, et al. (1997). "Morteros de albañilería con escombros de demolición." *Materiales de Construcción* 47(246).

³²¹ Hincapié Henao, A. M. and E. A. Aguja López (2003). "Agregado para morteros." *EAFIT* 39(132): 76-89.

La disminución de resistencia pueden ser considerable al aumentarse la cantidad de áridos reciclados en la mezcla, llegándose a producir descensos de 8,28 a 1,10 MPa a los 7 días, y de 13,92 a 2,13 MPa para los 28 días (Vegas, Azkarate et al. 2009)³²². Estos descensos ocasionarían el encarecimiento del mortero debido a la necesidad de aumentar el contenido en cemento para llegar a unas resistencias mínimas. Otros autores evalúan estas pérdidas de resistencia entre un 5-10 % (Hung, Nam et al. 2008)³²³ y el 20% (Hincapié Henao and Aguja López 2003)³²⁴.

RESISTENCIA A COMPRESIÓN (MPa)							
AN/AR	100/0	90/10	80/20	75/25	50/50	25/75	0/100
7 días	8,28	6,03	5,37	4,93	2,58	1,53	1,10
28 días	13,92	11,21	9,24	9,17	5,11	3,10	2,13

Tabla 3.34: Valores de la resistencia a compresión para diferentes proporciones entre árido natural/árido reciclado (Vegas, Azkarate et al. 2009)³²².

La reducción de la resistencia a compresión en los morteros no es importante si el porcentaje de sustitución es bajo (Corinaldesi, Giuggiolini et al. 2002; Bektas, Wang et al. 2009)^{325 326}.

Algunos autores vinculan la disminución de la resistencia tanto al aumento del porcentaje de sustitución de los áridos naturales, como a la naturaleza de los áridos reciclados, determinado que las resistencias obtenidas son mayores sólo cuando el árido reciclado procede del hormigón y no en el caso

³²² Vegas, I., I. Azkarate, et al. (2009). "Diseño y prestaciones de morteros de albañilería con áridos reciclados procedentes de escombros de hormigón." *Materiales de Construcción* 59.

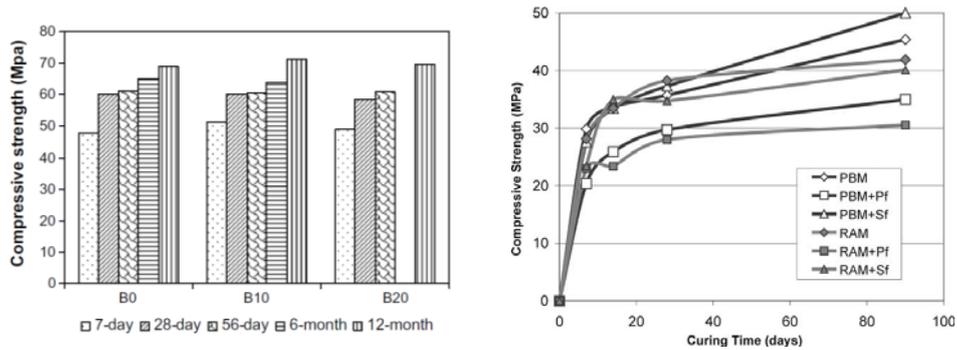
³²³ Hung, L. V., V. H. Nam, et al. (2008). Study on recycled demolished building waste to use as aggregate for concrete for concrete and mortar. The 3^o ACF International Conference-ACV/VCA: 644-650.

³²⁴ Hincapié Henao, A. M. and E. A. Aguja López (2003). "Agregado para morteros." *EAFIT* 39(132): 76-89.

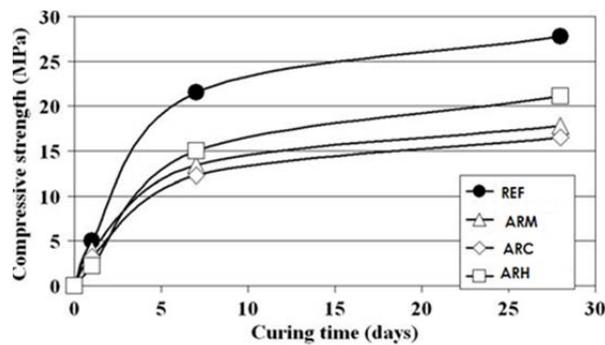
³²⁵ Corinaldesi, V., M. Giuggiolini, and G. Moriconi, Use of rubble from building demolition in mortars. *Waste Management*, 2002. 22(8): p. 893-899.

³²⁶ Bektas, F., K. Wang, and H. Ceylan, Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability. *Construction and Building Materials*, 2009. 23(5): p. 1909-1914.

de que esté formado por restos de otros materiales, dándose este comportamiento tanto a los 7 días como a los 28 días.



Gráfica 3.6 Relación entre la resistencia a compresión y el porcentaje de árido sustituido (Corinaldesi, Giuggiolini et al. 2002; Bektas, Wang et al. 2009)^{325 326}.



Gráfica 3.7 Influencia del tipo de árido reciclado en la resistencia a compresión (Corinaldesi and Moriconi 2009)³²⁷.

Estos afirman que el descenso es debido a la menor densidad y mayor absorción de los áridos reciclados en comparación con los áridos naturales, y que solamente se consiguen resistencias a compresión superiores a 20 MPa, cuando los áridos proceden de hormigón, probablemente debido a la forma angulosa de las partículas, que juega un papel positivo en el comportamiento de la interfase árido-pasta (Corinaldesi and Moriconi 2009)³²⁷.

³²⁷ Corinaldesi, V. and G. Moriconi, Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. Construction and Building Materials, 2009. 23(1): p. 289-294.

3.5.5. Resistencia a flexión

La resistencia a flexión sigue modelos aproximados a los que se dan en el comportamiento a compresión.

En la Tabla 3.36 se muestran los valores de la resistencia a flexión en función del tiempo de curado y la dosificación de los morteros. Como se puede observar, se producen disminuciones en los valores de la resistencia a flexión según se incrementa la proporción de los áridos reciclados, tanto a los 7 días como a los 28 días, llegando estos descensos hasta el 80% (Corinaldesi and Moriconi 2009)³²⁸.

RESISTENCIA A FLEXIÓN (MPa)						
Cemento-árido	7 días	14 días	28 días	AN/AR	7días	28 días
1:4	2,6	2,63	3,06	100/0		3,6
1:5	1,01	2,59	2,86	90/10	1,61	3,09
1:6	0,92	1,84	2,04	80/20	1,61	2,55
1:8	0,69	1,37	1,52	75/25	1,40	2,53
				50/50	0,83	1,44
				25/75	0,51	0,92
				0/100	0,40	0,64

Tabla 3.35: Valores de la resistencia a flexión en función de la dosificación y proporción entre árido natural/árido reciclado (Álvarez Cabrera, Urrutia et al. 1997; Corinaldesi and Moriconi 2009)^{329 328}.

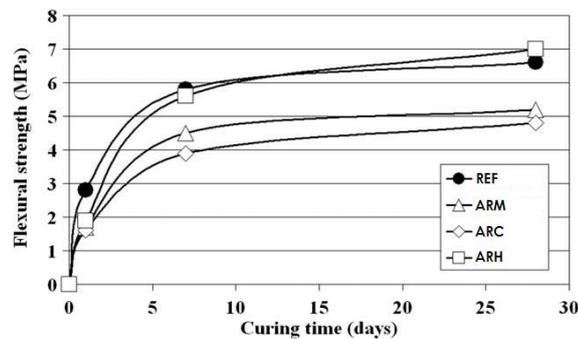
Lo mismo sucede cuando se disminuye la relación cemento-árido reciclado, con caídas de resistencia entre el 50% al 70%, en función de los días de curado (Álvarez Cabrera, Urrutia et al. 1997)³²⁹.

³²⁸ Corinaldesi, V. and G. Moriconi, Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 2009. 23(1): p. 289-294.

³²⁹ Álvarez Cabrera, J.L., et al., Morteros de albañilería con escombros de demolición. *Materiales de Construcción*, 1997. 47(246)

Como en el caso de la resistencia a compresión, la composición de los áridos reciclados también influye en el comportamiento de la resistencia a flexión, siendo en todos los casos menores que las del mortero de referencia, produciéndose la menor disminución para los áridos reciclados de hormigón (ARH), y la mayor para el árido reciclado cerámico (ARC). Este descenso tan acusado se produce por su menor densidad y la mayor absorción del árido reciclado (Corinaldesi 2009)³³⁰.

En la Gráfica 3.8 (Corinaldesi and Moriconi 2009)³³⁰, se refleja la evolución de la resistencia a flexión en función de la edad y de la compresión del árido reciclado.



Gráfica 3.8: Influencia del tipo de árido reciclado en la resistencia a flexión (Corinaldesi and Moriconi 2009)³³⁰.

3.5.6. Retracción

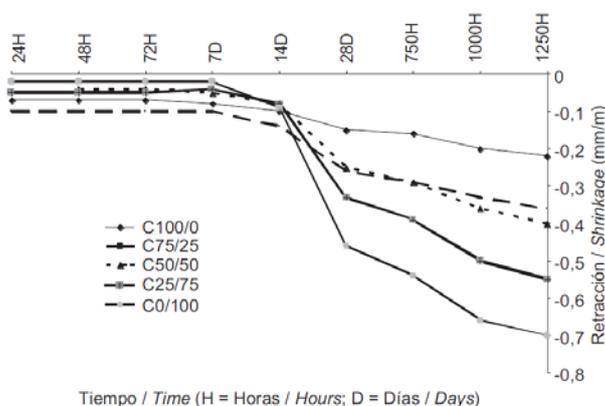
Como se ha indicado, la absorción de los áridos reciclados es mayor que la de los áridos naturales, por lo que es necesaria una mayor cantidad de agua de amasado para conseguir la misma consistencia. Este incremento de la cantidad de agua provoca una mayor retracción, siendo éste uno de los posibles problemas a los que hay que enfrentarse cuando se trabaja con áridos reciclados (Bustillo 2010)³³¹.

³³⁰ Corinaldesi, V., Mechanical behavior of masonry assemblages manufactured with recycled-aggregate mortars. *Cement and Concrete Composites*, 2009. 31(7): p. 505-510.

³³¹ Bustillo, M., Manual de RCD y áridos reciclados 2010: Fueyo Editores.

Por ello, no es recomendable que el contenido de agua sea alto, ya que pueden producirse mayores retracciones que pueden dar lugar a la aparición de grietas y fisuras. Como se puede apreciar en la Gráfica 3.9, la retracción aumenta con el tiempo y, sobre todo, al incrementarse el porcentaje de sustitución de árido reciclado, pudiendo alcanzar valores a las 1250 horas, de 0,22 mm/m para el mortero patrón de referencia y de 0,7 mm/m para el mortero que incorpora en su totalidad áridos reciclados (Vegas, Azkarate et al. 2009)³³².

Estos valores son similares a los mostrados por otros autores, quienes estudian el incremento de la retracción según aumenta el tiempo. De esta forma, los morteros con áridos naturales alcanzan su estabilidad a los 100 días, mientras que en el caso de los morteros con áridos reciclados de escombros de hormigón la estabilidad no se produce, pues la retracción sigue aumentando hasta los 480 días (Mesbah and Buyle-Bodin 1999)³³³.



Gráfica 3.9: Valores de la retracción en función de la cantidad de árido reciclado en los morteros (Vegas, Azkarate et al. 2009)³³².

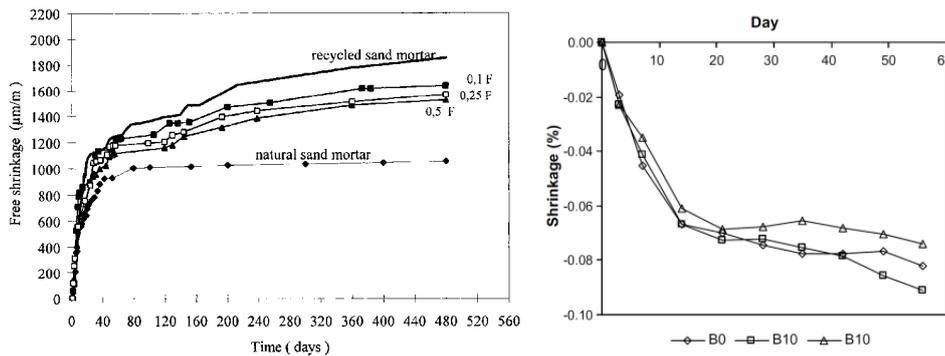
Sin embargo, existen otros estudios en los que los resultados no son tan concluyentes, obteniéndose comportamientos en la retracción muy parecidos

³³² Vegas, I., I. Azkarate, et al. (2009). "Diseño y prestaciones de morteros de albañilería con áridos reciclados procedentes de escombro de hormigón." *Materiales de Construcción* 59.

³³³ Mesbah, H.A. and F. Buyle-Bodin, Efficiency of polypropylene and metallic fibres on control of shrinkage and cracking of recycled aggregate mortars. *Construction and Building Materials*, 1999. 13(8): p. 439-447.

entre morteros de referencia y morteros con áridos reciclados cerámicos (ARC) con sustituciones entre el 10-20% (Bektas, Wang et al. 2009)³³². En ese estudio se justifica este comportamiento por la acción de las partículas de ladrillo, que actúan como elementos con poder de curado propio, de tal forma que mantienen el agua, absorbida inicialmente, en sus poros durante largos periodos de tiempo, para luego ir liberándola lentamente a edades posteriores. Como consecuencia, la retracción sufre un retraso, ya que el periodo de hidratación continua por la presencia de la humedad interna.

Este fenómeno fue descrito por estudios que pudieron constatar un descenso de la retracción según se aumentaba la cantidad del árido reciclado cerámico añadido en sustitución del árido natural (Mansur, Wee et al. 1999)³³⁴.



Gráfica 3.10: Evolución de la retracción con el tiempo (derecha) (Mesbah and Buyle-Bodin 1999)³³³. Evolución de la retracción para morteros con áridos reciclados cerámicos (izquierda) (Bektas, Wang et al. 2009)³³².

Por otra parte, la incorporación de aditivos no mejora el comportamiento de la retracción en los morteros con áridos reciclados, pues aumenta según se incrementa el contenido en aireante-plastificante, desde una valor de 0,445 mm/m a los 28 días para un mortero patrón M5, con tan solo 0,15 gr/kg de aireante, hasta 0,709 mm/m a los 28 días con un mortero con un 25% de

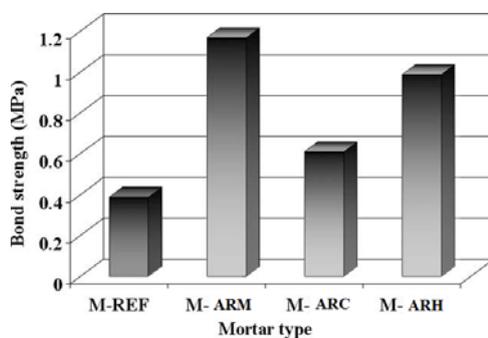
³³⁴ Mansur, M.A., T.H. Wee, and L.S. Cheran, Crushed bricks as coarse aggregate for concrete. ACI Materials Journal, 1999. 96: p. 478-484.

sustitución de áridos reciclados y con 1,0 gr/Kg de aireante-plastificante (Vegas, Azkarate et al. 2009)³³⁵.

3.5.7. Adherencia del mortero a las fábricas

Esta es una propiedad muy importante en los morteros de albañilería, siendo su misión unir los diferentes elementos que forman la fábrica.

Se han realizado estudios para determinar el grado de variación que tienen los áridos reciclados sobre esta propiedad (Corinaldesi and Moriconi 2009)³³⁶.



Gráfica 3.11: Resistencia de adhesión entre el mortero y el ladrillo en diferentes tipos de morteros reciclados (Corinaldesi and Moriconi 2009)³³⁶.

Como se puede apreciar, con independencia de que el árido reciclado sea de hormigón (ARH), cerámico (ARC), o mixto (ARM), estos morteros presentan una mayor adherencia a los ladrillos que los morteros con áridos naturales (REF).

De acuerdo con los autores del estudio, esto es debido a las altas relaciones agua-cemento que deben tener los morteros reciclados para conseguir la trabajabilidad óptima y, de esta forma, poder impregnar mejor la superficie del ladrillo, asegurando así una sólida unión física entre el ladrillo y los morteros, y en consecuencia, una mejor adherencia.

³³⁵ Bektas, F., K. Wang, and H. Ceylan, Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability. *Construction and Building Materials*, 2009. 23(5): p. 1909-1914.

³³⁶ Corinaldesi, V. and G. Moriconi, Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 2009. 23(1): p. 289-294

Estos resultados coinciden con otros (Corinaldesi, Giuggiolini et al. 2002; Moriconi, Corinaldesi et al. 2003)^{337 338}, en los que se justifica el mejor comportamiento de la adhesión de los morteros reciclados frente a los morteros con áridos naturales, a la baja tixotropía de los áridos reciclados junto con una apropiada distribución de poros en los ladrillos, propiedad ésta muy importante también en el desarrollo de la adhesión entre el mortero y el ladrillo.

3.5.8. Durabilidad frente ataque por sulfato de magnesio

Debido a la importancia de la degradación de los morteros por la acción de sulfatos, resulta importante conocer la durabilidad de los morteros con áridos reciclados y establecer el comportamiento de éstos frente a los ataques por sulfatos. Se puede afirmar que el porcentaje de sustitución de los áridos reciclados juega un papel clave en los valores de resistencia a compresión cuando los morteros están sujetos al ataque por sulfatos, al margen del árido reciclado que se considere, observándose la máxima degradación para una sustitución del 100%. Sin embargo, con niveles de sustitución aproximados del 50%, pueden tener un efecto beneficioso en el comportamiento (Bustillo 2010)³³⁹.

Existen estudios en esta línea donde se analiza el comportamiento de los morteros con diferentes porcentajes de sustitución de los áridos naturales por áridos reciclados (0%,25%,50%,75% y 100%) frente al ataque por sulfato de magnesio, presentando las conclusiones a través de pérdida de resistencia compresión y de la expansión, junto con la búsqueda de la nueva formación de fases minerales por difracción de rayos X (Lee 2009)³⁴⁰.

³³⁷ Corinaldesi, V., M. Giuggiolini, and G. Moriconi, Use of rubble from building demolition in mortars. *Waste Management*, 2002. 22(8): p. 893-899.

³³⁸ Moriconi, G., V. Corinaldesi, et al. (2003). "Environmentally-friendly mortars: a way to improve bond between mortar and brick." *Materials and Structures* 36(10): 702-708

³³⁹ Bustillo, M., Manual de RCD y áridos reciclados 2010. Fueyo Editores.

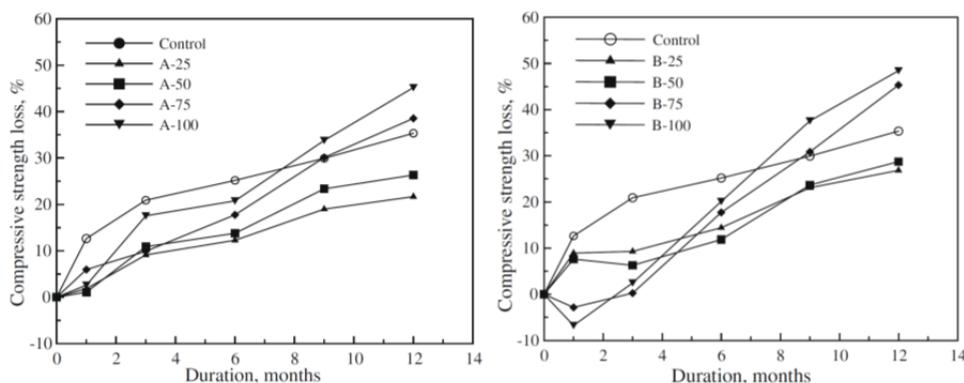
³⁴⁰ Lee, S.-T., Influence of recycled fine aggregates on the resistance of mortars to magnesium sulfate attack. *Waste Management*, 2009. 29(8): p. 2385-2391.

En el citado estudio, que completa los resultados obtenidos en los trabajos realizados de Lee, se utilizan dos tipos de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (A y B), cuya composición química es muy parecida, pero con diferentes propiedades físicas varían notablemente. (Tabla 3.37) (Lee 2009)³⁴¹.

PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS ÁRIDOS UTILIZADOS				
Tipo árido	Densidad Kg/m ³	Absorción %	Mortero adherido %	Módulo de finura
Natural	2600	0,80	-	2,80
Tipo A	2390	6,59	6,95	2,89
Tipo B	2280	10,35	7,10	3,42

Tabla 3 36: Propiedades físicas de los áridos utilizados en el estudio del ataque por sulfato magnesio (Lee 2009)³⁴¹.

Del citado estudio se puede concluir que la pérdida de resistencia a compresión depende significativamente del porcentaje de árido reciclado presente en el mortero, y que dichas pérdidas son máximas tanto para el árido tipo A y B, especialmente a los 12 meses, y se incrementan según aumenta el tiempo de exposición, como indican las pendientes ascendentes de las rectas.



Gráfica 3.12: Pérdidas de resistencia a compresión. (Lee 2009)³⁴¹.

³⁴¹ Lee, S.-T., Influence of recycled fine aggregates on the resistance of mortars to magnesium sulfate attack. Waste Management, 2009. 29(8): p. 2385-2391.

Del análisis de la Gráfica 3.12 (Lee 2009)³⁴¹, se puede afirmar que en los áridos tipo A al principio dicha pérdida es muy similar a la del mortero de control, para luego, con el tiempo, irse separando. Pasados nueve meses, las muestras con mayores porcentajes de sustitución (75 y 100%) son las que experimentan las pérdidas más altas. Por otra parte, los morteros con sustituciones bajas (25 y 50%) son más resistentes al ataque por sulfatos que el mortero de control. En cuanto a los morteros con árido tipo B, con altas sustituciones (75 y 100%) incrementan su resistencia a compresión, debido al relleno de los poros por el producto de la reacción expansiva, lo que hace que los morteros sean más densos. Sin embargo, a partir del tercer mes, la pérdida se incrementa al aumentar el tiempo de exposición. Si se comparan los valores de las pérdidas de resistencia de los morteros, se comprueba que las del árido tipo A, son más bajas que las del tipo B.

Si se tiene en cuenta los porcentajes de sustitución, se observa que, a los doce meses, en los niveles más bajos de sustitución (25 y 50%), con independencia del tipo de árido (A ó B), se producen mejores comportamientos frente al ataque por sulfato de magnesio. Por el contrario, con porcentajes altos (75 y 100%) desarrollan un peor comportamiento.

3.5.9. Reacción álcali-árido

La variedad de compuestos presentes en los áridos reciclados posibilita que se produzcan reacciones no deseadas entre los elementos alcalinos del cemento y determinados compuestos silíceos presentes en ellos.

Existen estudios (Bektas, Wang et al. 2009)³⁴², donde se relaciona la expansión de los morteros con áridos reciclados cerámicos (ARC), en diferentes porcentajes de sustitución, comparándola con la de morteros fabricados con árido natural calizo.

Como se aprecia en la Gráfica 3.13, con sustituciones del 10% la expansión a los 14 días presenta valores del 0,30% y del 0,35% para

³⁴² Bektas, F., K. Wang, and H. Ceylan, Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability. *Construction and Building Materials*, 2009. 23(5): p. 1909-1914.

sustituciones del 20%, estos valores son superiores al límite del 0,20% establecido por la norma ASTM C1260, siendo visibles en el experimento las grietas que se originan en las probetas de mortero.

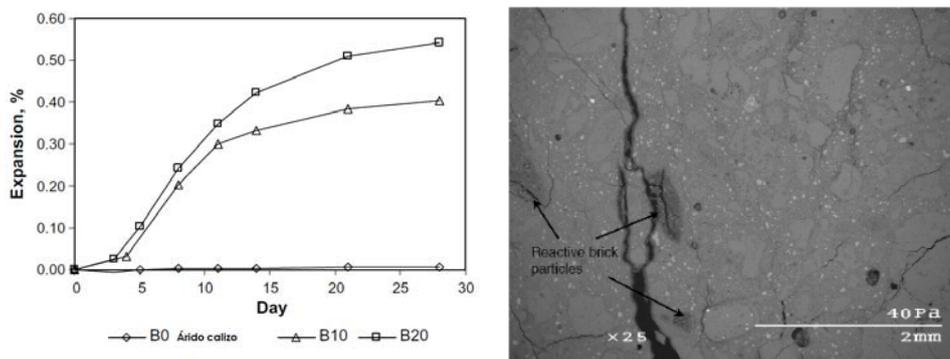
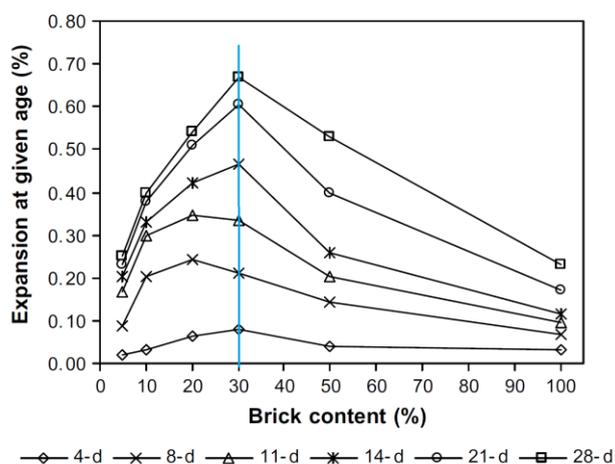


Figura 3.13: Expansión de los morteros con ARC. Fisuras internas del mortero debido a la expansión por la reacción álcali-árido (Bektas, Wang et al. 2009)³⁴³.



Gráfica 3.13: Evolución de la expansión en función al porcentajes de sustitución (Bektas, Wang et al. 2009)³⁴³.

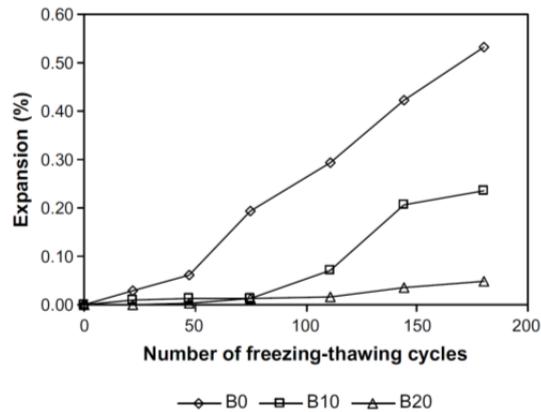
Los autores de este estudio ensayaron mezclas con distintas proporciones de sustitución de áridos naturales por áridos reciclados cerámicos,

³⁴³ Bektas, F., K. Wang, and H. Ceylan, Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability. Construction and Building Materials, 2009. 23(5): p. 1909-1914.

comprobando que la sustitución que presentaba fenómenos más acusados de expansión se producía con el 30% de áridos reciclados.

3.5.10. Durabilidad frente a ciclos de hielo-deshielo

Los morteros fabricados con árido reciclado cerámico (ARC) presentan un buen comportamiento frente a los procesos expansivos producidos cuando están expuestos a ciclos de hielo-deshielo. Los resultados óptimos se dan en sustituciones del árido natural por árido reciclado en torno al 20%, comprobando que la expansión disminuye a medida que aumenta el porcentaje de sustitución (Bektas, Wang et al. 2009)³⁴³.



Gráfica 3.14: Expansión de los morteros con ARC debido a la acción de ciclos de hielo-deshielo (Bektas, Wang et al. 2009)³⁴³.

Esto es debido a la naturaleza cerámica de los áridos reciclados que es altamente porosa de los ladrillos triturados. Esta porosidad posibilita la entrada de aire, produciéndose pequeñas burbujas que mitigan la presión causada por la formación del hielo y el flujo de agua, así como impedir que el agua progrese en el interior del mortero, es decir, las burbujas de aire adecuadamente distribuidas ofrecen espacio para los mecanismos de expansión.

3.5.11. Morteros de revoco/enlucido con áridos reciclados

Pocos son los estudios que han analizado las propiedades de los morteros de revestimientos cuando incluyen en su dosificación áridos reciclados,

propiedades que en algunos casos poseen una importancia comparable a los morteros de albañilería, pero que, en otros, son muy específicas de los morteros de revestimiento, como es la adherencia a los soportes.

Esta propiedad es, probablemente, la más relevante en los morteros de revestimiento, pues de ella depende la estabilidad del recubrimiento, ya que una baja adherencia puede producir despegues del soporte.

El tipo de soporte juega un papel decisivo en esta propiedad, ya que no es mismo ejecutar un mortero sobre una superficie rugosa, que genera una mayor adherencia, que sobre una superficie lisa. Soportes como el ladrillo o los bloques de hormigón producen una alta adherencia, mientras que soportes vitrificados, plastificados o pintados presentan valores más bajos.

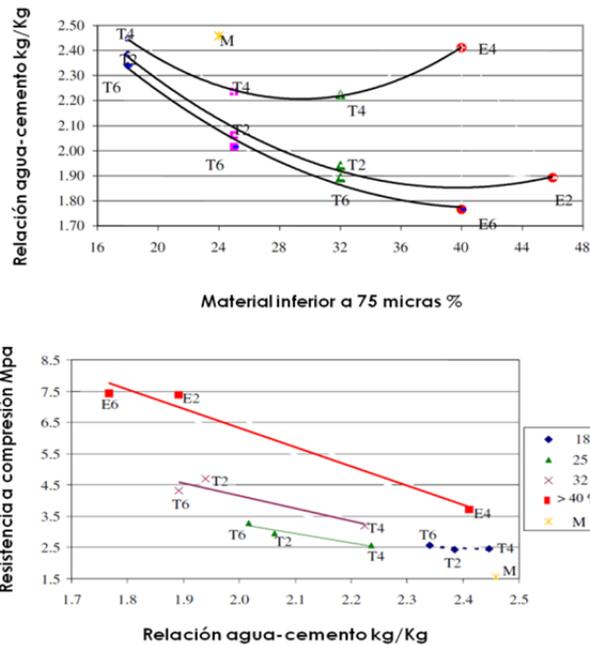
Existen estudios que han analizado la influencia de las partículas inferiores a 75 micras en las propiedades de los morteros (Miranda and Selmo 2006; Silva, Brito de et al. 2008; Silva, Brito et al. 2009)^{344 345346}. Se afirma que las partículas inferiores a 75 micras son, junto con la relación agua-cemento, los dos parámetros básicos para el diseño de los morteros de revestimiento. Por otro lado, las propiedades mecánicas (resistencia a compresión, resistencia a tracción, retracción, etc.), están condicionadas por la relación agua-cemento, siempre que la composición de los áridos reciclados se mantenga constante.

En estos estudios se afirma que la cantidad total de las partículas inferiores a 75 micras, es el mejor parámetro para determinar la retracción de los morteros de revestimiento, debido a que la distribución de los tamaños de poros generados por la presencia de finos, es más decisiva en la retracción por secado, que la de la porosidad inducida por la relación agua-cemento.

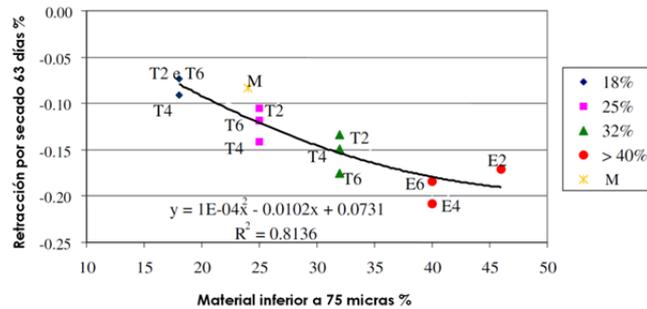
³⁴⁴ Miranda, L. and S. Selmo (2006). "CDW recycled aggregate renderings: Part I - Analysis of the effect of materials finer than 75 μm under accelerated aging performance." *Construction and Building Materials* 20(9): 625-633.

³⁴⁵ Silva, J., J. Brito de, et al. (2008). "Fine ceramics replacing cement in mortars. Partial replacement of cement with fine ceramics in rendering mortars." *Materials and Structures* 41: 1333-1334.

³⁴⁶ Silva, J., J. d. Brito, et al. (2009). "Incorporation of fine ceramics in mortars." *Construction and Building Materials* 23(1): 556-564.



Gráfica 3.15: Relación entre la cantidad de material inferior a 75 micras y la relación agua-cemento, relación ente la resistencia a compresión y relación agua-cemento (Miranda and Selmo 2006)³⁴⁴.



Gráfica 3. 16: Relación entra la cantidad de material inferior a 75 micras y la retracción (Miranda and Selmo 2006)³⁴⁴.

Respecto de la formación de grietas, aspecto decisivo en los morteros de revestimiento debido tanto a criterios de durabilidad como a de su aspecto estético, éstos estudios afirman que las grietas visibles tienen lugar, generalmente, en aquellos morteros que poseen importantes cantidades de finos en su dosificación, de forma que, si el contenido de cemento se mantiene constante, la cantidad de finos es el parámetro más práctico para el control de su posible agrietamiento, presentando este factor más importancia

cuanto mayor es el contenido de mortero adherido a los áridos reciclados, por lo que es conveniente mantener la cantidad de finos lo más baja posible, con el objetivo de conseguir una buena trabajabilidad, siendo la proporción del 25% un valor crítico para el desarrollo de grietas en el revestimiento (Miranda and Selmo 2006)³⁴⁷.

Otro estudio analiza la posibilidad de sustituir en la composición de los morteros de revestimiento, parte de la cantidad de cemento por polvo de ladrillos, dado el carácter puzolánico de este producto, lo que redundaría en una disminución del coste de fabricación del mortero, así como una mejora en la gestión ambiental, pues desciende el consumo de cemento. Los resultados del estudio indican que la citada sustitución es posible, dado que las propiedades mecánicas de los morteros no sufren disminuciones, y que otras propiedades, como la permeabilidad al agua bajo presión, resultan mejoradas (Silva, Brito de et al. 2008)³⁴⁸. En otro estudio realizado por mismos autores se afirma que un 10% de sustitución del cemento por el citado polvo de ladrillos presenta una mejora en el comportamiento de prácticamente todas las propiedades, excepto la retracción y la permeabilidad al vapor de agua, siendo en éstas las disminuciones no significativas. Así, un incremento de un 13% en la retracción representa un descenso de un 25% en la permeabilidad de agua al vapor de agua (Silva, Brito de et al. 2008)³⁴⁸.

³⁴⁷ Miranda, L. and S. Selmo, CDW recycled aggregate renderings: Part I - Analysis of the effect of materials finer than 75 µm under accelerated aging performance *Construction and Building Materials*, 2006. 20(9): p. 625-633.

³⁴⁸ Silva, J., J. Brito de, and R. Veiga, Fine ceramics replacing cement in mortars. Partial replacement of cement with fine ceramics in rendering mortars. *Materials and Structures*, 2008. 41: p. 1333-1334.

CAP. IV CARACTERIZACIÓN MATERIALES

Capítulo 4: CARACTERIZACIÓN MATERIALES

4.1. INTRODUCCIÓN

Para la realización de esta Tesis Doctoral se han utilizado los materiales básicos con los que se fabrica un mortero: cemento, áridos naturales, arcilla expandida, áridos reciclados y agua.

En este apartado se estudiarán cada uno de estos componentes, determinando sus principales características.

4.2. CEMENTO

Entre los componentes que forman parte de los morteros y hormigones, el cemento es el material de mayor importancia, ya que contribuye a mantener la solidez de los morteros y hormigones que se fabrican con él.

El cemento es un material con propiedades hidráulicas ya que, en presencia de agua, sus componentes mineralógicos reaccionan y se transmutan, transformándose en otros que forman estructuras cristalinas rígidas interconectadas entre sí. Para la investigación realizada en esta Tesis Doctoral se ha utilizado un único tipo de cemento, el CEMI 42,5 R, fabricado por la empresa Cementos Portland Valderribas en su factoría de Mataporquera en Cantabria.

Las propiedades de este tipo de cemento, de acuerdo con la documentación técnica facilitada por la empresa, son sus elevadas resistencias iniciales a edades tempranas y una superficie específica baja, lo cual permite elaborar morteros u hormigones con una menor cantidad de agua, consiguiendo mezclas muy trabajables de consistencia plástica, por lo que se reduce el riesgo de retracciones. Su uso está recomendado para la realización de hormigones en masa, armados y pretensados de alta resistencia.

Las características técnicas del cemento facilitadas por el fabricante se recogen en las Tablas 4.1, 4.2 y 4.3.

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS	
Compresión a 1 día (MPa)	18
Compresión a 2 día (MPa)	33
Compresión a 7 día (MPa)	40
Compresión a 28 día (MPa)	54

Tabla 4.1: Características mecánicas. Certificado de la fábrica

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS y QUÍMICAS	
Propiedades físicas	
Superficie específica Blaine (cm ² /g)	3400
Expansión Le Chatelier (mm)	0
Tiempo de inicio de fraguado (minutos)	170
Tiempo de final de fraguado (minutos)	220
Propiedades químicas	
Trióxido de azufre (SO ₃) (%)	3.2
Cloruros (Cl) (%)	0,01
Pérdida por calcinación (%)	3,2
Residuo soluble (%)	1,4

Tabla 4.2: Características físicas y químicas. Certificado de la fábrica.

El cemento utilizado, al ser un material muy fino, presenta una porosidad muy reducida que puede considerarse despreciable, por lo que podemos equivaler su volumen relativo con el volumen real.

COMPONENTES	
Clinker (%)	95
Caliza (L) (%)	5
Puzolana (P) (%)	-
Cenizas Volantes (V) (%)	-
Escoria Siderúrgica (S) (%)	-
Regulador del fraguado - yeso (%)	5

Tabla 4.3: Componentes del cemento. Certificado de la fábrica.

A demás de la caracterización facilitada por la empresa, se han determinado algunas otras propiedades, como la densidad real, que viene

definida como la relación entre el peso de una muestra en seco y el volumen real o de la parte sólida del mismo, es decir, excluyendo los poros tanto accesibles como inaccesibles. La determinación ha sido realizada mediante un picnómetro y según la norma UNE 80.103 (AENOR 2013)³⁴⁹.

Para la realización del ensayo se pesa una cantidad de muestra en un papel limpio (P_1), y un líquido no reactivo en un matraz de Le Chatelier (Figura 4.1), hasta una altura cualquiera de la escala inferior del cuello del matraz y se anota el volumen alcanzado (V_1).

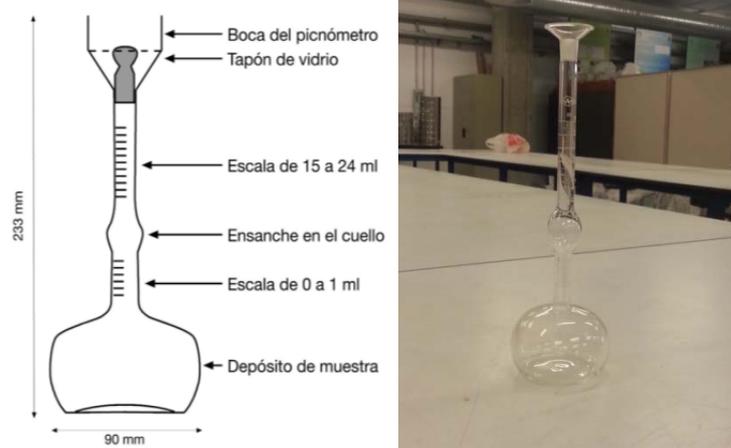


Figura 4.1: Esquema del matraz de Le Chatelier de 250 ml.

Con la ayuda de una varilla helicoidal, se introduce una parte del cemento pesado anteriormente hasta lograr que el líquido, superando el ensanche del matraz, alcance una altura cualquiera de la escala superior de su cuello y se anota el volumen (V_2) correspondiente. Junto con el papel limpio se pesa el material sólido sobrante (P_2), de tal manera que se asume que la masa del cemento introducida en el matraz es $P_1 - P_2$.

La densidad real viene dada por la siguiente expresión:

$$D_{real} = \frac{P_1 - P_2}{V_2 - V_1}$$

³⁴⁹ AENOR (2013). UNE 80.103. "Métodos de ensayo de cementos. Ensayos físicos. Determinación de la densidad real".

DENSIDAD REAL DEL CEMENTO	
Densidad real Kg/m ³	3160

Tabla 4.4: Densidad real del cemento.

También se ha determinado la composición química del cemento utilizando espectroscopia de fluorescencia electromagnética. Mediante la fluorescencia podemos caracterizar las sustancias que son capaces de absorber energía en forma de radiaciones electromagnéticas y luego emitir esta energía en forma de radiación electromagnética con diferentes longitudes de onda.

ANÁLISIS QUÍMICO DEL CEMENTO CEM I - 42,5	
Elementos	%
Si O ₂	21,3
Fe ₂ O ₃	4
Al ₂ O ₃	6,1
Ca O	60,4
Mg O	1,5
K ₂ O	1,3
Na ₂ O	0,4
Otros	4,3
Pérdidas por calcinación	2

Tabla 4.5: Análisis químico del cemento CEM I - 42,5.

4.3. ÁRIDOS

4.3.1. Árido natural

Para la realización de los ensayos se ha utilizado arena lavada procedente de la gravera de Cubillo del Campo, seleccionada entre otras dos graveras próximas a la ciudad de Burgos, como la de Olmos de Atapuerca y la de Espinosa de Juarros.

Para su selección se determinaron sus líneas granulométricas, y se fabricaron tres probetas de mortero de cemento con cada una de las arenas, valorando sus resistencias mecánicas a 7 días, y a 28 días.

Todas las arenas llegaron al laboratorio desde la cantera en estado natural, y se secaron en estufa de laboratorio.

El estudio de la granulometría se realiza mediante tamizado, de acuerdo con las prescripciones técnicas recogidas en la Norma UNE-EN 933-1 (AENOR 2006)³⁵⁰.



Figura 4.2: Arenas lavadas de diferentes graveras de Burgos.

Este ensayo consiste en ensamblar una serie de tamices de tela metálica con una luz de malla en mm de: 4 - 2 - 1- 0,50 - 0,25 - 0,125 y 0,063 mm, dispuestos de arriba abajo en orden decreciente a los tamaños de abertura.

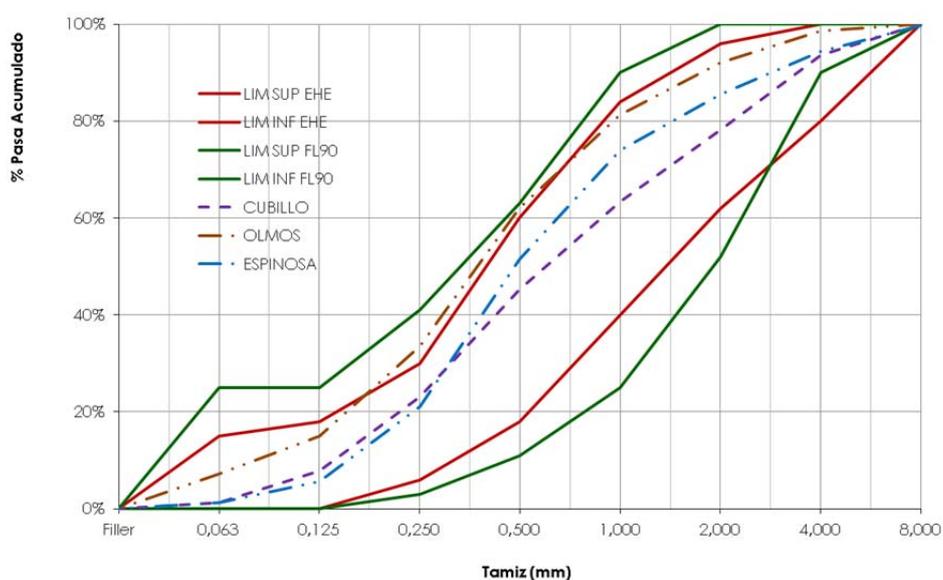
La muestra a analizar se coloca en la parte superior y se agita hasta que todo el material quede retenido según su tamaño en los diferentes tamices, para, posteriormente, pesar la fracción del material que ha quedado retenido depositada en cada tamiz.

De cada una de las arenas se han determinado dos granulometrías, siendo el resultado que aparece en la Tabla 4.6 y en la Gráfica 4.1, el valor medio de cada una de ellas.

³⁵⁰ AENOR (2006). "UNE-EN 933-1. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado".

GRANULOMETRÍAS DE LAS ARENAS									
Tamiz	8	4	2	1	0.5	0.25	0.125	0.063	fondo
Cubillo	0	123,7	300,6	286,6	349,4	429,8	295,4	127,5	25,1
Olmos	0	29,9	148,1	241,8	426,6	637,9	413,8	175,2	161,5
Espinosa	6,3	113,7	177,3	231,4	451,7	610,0	309,2	88,0	25,8

Tabla 4.6: Granulometrías de las diferentes arenas lavadas.

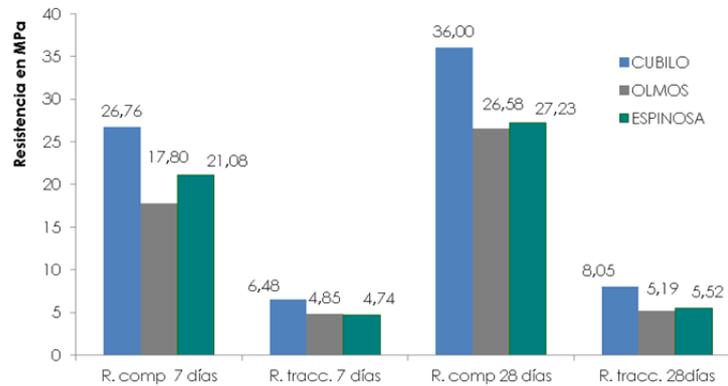


Gráfica 4.1: Líneas granulométricas de las diferentes arenas lavadas en comparación con los límites de EHE08 y NBE-FL 90.

Como se puede apreciar en la Gráfica 4.1, las tres arenas cumplen con los límites fijados por NBE-FL-90 y la EHE08, con algunos ligeros matices, como en el caso de la arena de Olmos de Atapuerca.

Los resultados de rotura de las probetas presentaron los valores indicados de la Gráfica 4.2.

A la vista de los resultados de resistencia obtenidos, se seleccionó la arena de Cubillo del Campo para fabricar los morteros base y de referencia de las investigaciones.



Gráfica 4.2: Roturas probetas de diferentes arenas lavadas.

4.3.2. Áridos reciclados

Los áridos reciclados finos utilizados proceden de la Planta de Reciclado de la empresa Iglecar S.L., situada en Cortes (Burgos), y de Artepref perteneciente al grupo de empresas Gerardo de la Calle en Aranda de Duero (Burgos).

En la primera Planta de Reciclado se seleccionaron los áridos reciclados mixtos y en la segunda se obtuvieron áridos reciclados de hormigón.

El árido reciclado de hormigón procede de la fragmentación de piezas prefabricadas no aprovechables, bien por no haberse ejecutado las obras a las que iban destinadas, bien por defectos de fabricación, o por restos y excedentes del hormigonado diario.

El hormigón utilizado para conformar las piezas prefabricadas es de naturaleza autocompactante, por lo que contiene en su dosificación aditivos superfluidificantes y reductores de agua.



Figura 4.3: Acopios de los elementos prefabricados rechazados.

El tratamiento previo de las piezas de desecho se ha realiza en la propia fábrica, mediante los siguientes procesos:

- Trituración del material sobrante y de rechazo utilizando una pinza hidráulica, retirando las armaduras existentes. Los tamaños de árido resultantes están comprendidos entre los 0-150 mm.
- Tratamiento posterior mediante una trituradora de impactos para obtener árido reciclado de tamaño comprendido entre 0-30 mm.
- Por último, se criba el material para obtener una fracción de árido comprendida entre 0-12,5 mm.



Figura 4.4: Proceso de obtención del árido reciclado de hormigón.

El traslado del árido de la Planta de Artepref al Laboratorio de Construcción de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos se realizó mediante sacas de nylon de 300 kg. Posteriormente, se molturó y cribó, seleccionando la fracción de material igual o inferior a 4 mm.



Figura 4.5: Sacas de transporte del árido reciclado y cribado manual.

El árido reciclado mixto fue facilitado por la Planta Recicladora de la empresa Iglecar S.L. Previo a su selección, se estudió la forma de realizar la

toma de muestras, bien recogiendo el material directamente de las cintas de transporte o de los acopios de material seleccionado.

Por comodidad se decidió recoger el material de los acopios, tomando porciones de árido en tres zonas distintas. De cada zona se recogieron dos muestras junto a la base y otras dos en una zona intermedia, con el objetivo de que el material seleccionado fuera lo más homogéneo posible.

Aunque en los acopios se produce una segregación de tamaños, este factor no es determinante en la elección del material, ya que posteriormente se seleccionó en el Laboratorio de Materiales mediante tamizado, recogiendo solo la fracción comprendida entre los 0-4 mm.



Figura 4.6 : Toma de muestras del árido reciclado mixto.

Los áridos utilizados, tanto reciclados como naturales, deben cumplir con las especificaciones y requerimientos de la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 (Ministerio de Fomento 2008)³⁵¹.

Para ello, se ha realizado un estudio completo para determinar las características físicas, químicas y granulométricas de los áridos reciclados, y éstas se han comparado con las de los áridos naturales.

Los ensayos de caracterización de los áridos naturales y reciclados se recogen en las Tablas 4.7 y 4.8.

³⁵¹ Ministerio de Fomento (2008). "Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08".

CARACTERIZACIÓN DE LOS ÁRIDOS	
Ensayos físicos	Norma
Distribución granulométrica	UNE - EN 933-1
Densidad aparente	UNE - EN 1097-6
Absorción de agua	UNE - EN 1097-6
Resistencia a la fragmentación	UNE - 83.115
Clasificación componentes AR grueso	UNE - EN 933-11
Mortero adherido	-

Tabla 4.7: Ensayos físicos de caracterización de los áridos reciclados realizados.

CARACTERIZACIÓN DE LOS ÁRIDOS	
Ensayos químicos	Norma
Cloruros solubles en agua - Método Volhard	UNE - EN 1744-7
Pérdidas por calcinación	UNE - EN 1744-17
Sulfatos solubles en agua para áridos reciclados	UNE - EN 1744-10.2
Sulfatos solubles en ácido	UNE - EN 1744-12
Contaminantes ligeros	UNE - EN 1744-14.2
Solubilidad en agua	UNE - EN 1744-16
Compuestos orgánicos	UNE - EN 1744-15

Tabla 4.8: Ensayos químicos de caracterización de los áridos reciclados realizados.

4.3.3. Granulometría

La granulometría es la distribución de los componentes que caracterizan a un material granular con diferentes tamaños de partículas. Su distribución se expresa como la relación en porcentaje de los diferentes tamaños presentes en un tipo determinado de árido. La granulometría de los áridos reciclados puede variar en función al proceso de trituración utilizado en su molturación.

El procedimiento del ensayo consiste en la división y separación de los áridos en diferentes tamaños a través de una serie vertical de tamices, con luces de malla en tamaño decreciente.

El estudio de la granulometría se realiza de acuerdo a las prescripciones establecidas en la Norma UNE-EN 933-1 (AENOR 2006)³⁵².

El equipo utilizado para realizar el ensayo consta de una serie de siete tamices con la luz de malla decreciente, de acuerdo con la siguiente distribución en milímetros:

Serie de Tamices UNE-EN 4 - 2 - 1 - 0,50 - 0,25 - 0,125 - 0,063

En el fondo se dispone un recipiente para recoger los componentes finos de tamaño inferior a 0,063 mm.

El equipo está compuesto además por una tamizadora eléctrica programable (Figura 4.7), para producir una vibración determinada y facilitar el paso de las partículas por los diferentes tamices.

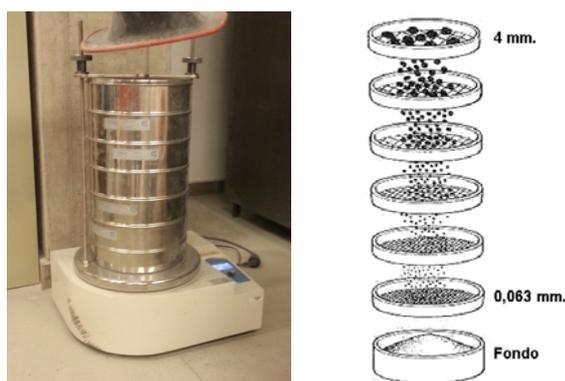


Figura 4.7: Tamizadora de vibración y set de tamices.

El material, previamente desecado, se deposita en el tamiz superior de 4 mm y se coloca una tapa para evitar la caída del material fuera del bastidor del tamiz. Se sujetan los tamices mediante una mordaza para evitar desplazamientos durante el proceso de vibrado, y se comienza a aplicar una frecuencia de vibración que posibilita el desplazamiento de las partículas hacia el fondo, quedando el conjunto retenido en los diferentes tamices según su tamaño.

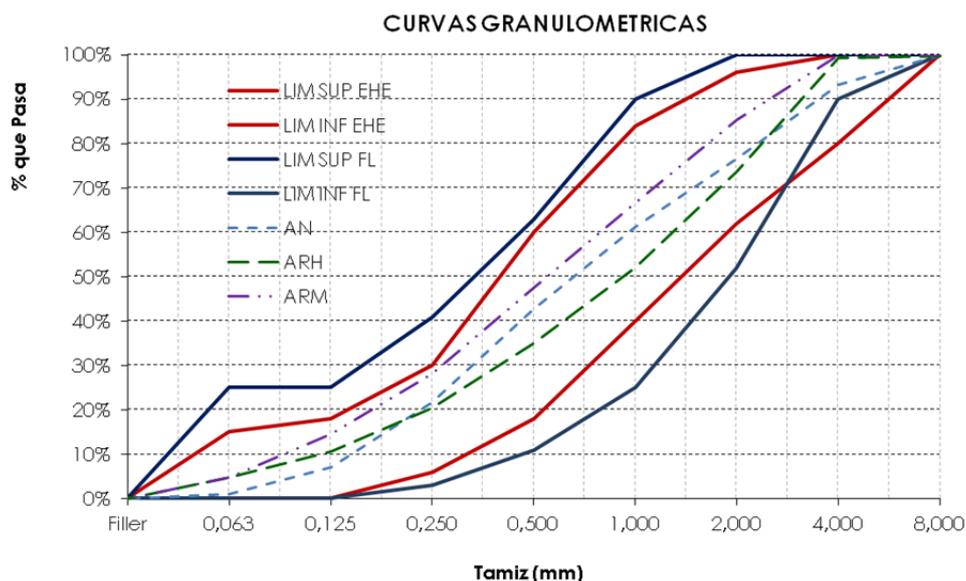
³⁵² AENOR (2006). UNE-EN 933-1. “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizando”.

Una vez tamizada la muestra se pesa la fracción de material de cada tamiz y se determina el porcentaje de la fracción retenida respecto del total de la muestra ensayada.

Las granulometrías del árido reciclado de hormigón (ARH), del árido reciclado mixto (ARM) y de la arena lavada (AN), se recogen en la Tabla 4.9 y en la Gráfica 4.3, expresando el porcentaje de material acumulado que pasa por cada tamiz, referido al peso de la muestra ensayada.

GRANULOMETRÍAS ÁRIDOS EN % QUE PASA ACUMULADO			
Luz tamiz en mm	Arena lavaba	ARH	ARM
8	100,00	99,38	100,00
4	92,23	99,23	99,99
2	76,54	73,79	85,45
1	61,16	52,05	66,59
0,50	42,75	35,03	47,55
0,25	21,71	20,38	28,15
0,125	7,07	10,58	14,51
0,063	1,08	4,71	4,81
Filler	0	0	0

Tabla 4.9: Granulometría de los áridos utilizados en % que pasa acumulado.



Gráfica 4.3: Curvas granulométricas de los áridos utilizados.

Como se puede comprobar, todas las curvas de los áridos ensayados están dentro de los límites de la EHE-08 y de la NBE-FL; y que tanto las correspondientes a los áridos naturales como a los áridos reciclados se asemejan en proporción y tamaño.

Por otra parte, las curvas granulométricas de los áridos reciclados en porcentaje acumulado en las fracciones finas están por encima de la curva del árido natural (AN), lo que significa que el árido reciclado es más grueso. Por el contrario, el árido reciclado de hormigón (ARH) es más fino en los tamaños intermedios y gruesos.

En cualquiera de los tres casos se puede observar que en torno al 60% de los áridos ensayados tienen un tamaño máximo de 0,5 mm.

4.3.4. Contenido en finos

El contenido de finos en los áridos es un factor crítico, ya que influyen directamente en la demanda de agua de las mezclas, en los procesos de retracción en el fraguado y en el endurecimiento. Para evitar estas contingencias, se controla el porcentaje de finos que pasan por el tamiz 0,063, bien determinando el valor del Equivalente de Arena o por Difracción de Rayos X.

En el ensayo de Difracción de Rayos X sólo se tiene en cuenta el contenido total de finos, mientras que en el Equivalente de Arena se considera también la naturaleza de los mismos.

En la Tabla 4.10 se representan el contenido en finos de los diferentes áridos utilizados.

CONTENIDO EN FINOS (%)				
Arena lavada	ARH	ARM	Arc. exp. 2-4	Arc.exp. 3-8
1,08	4,71	4,81	0	0

Tabla 4.10: Contenido de finos de los áridos utilizados para fabricar los morteros.

A la vista de los resultados obtenidos se puede afirmar que en todos los casos cumplen los requerimientos establecidos en la Instrucción de Hormigón

Estructural EHE-08 (<6%), y están en los parámetros recogidos en los diferentes estudios analizados en el Estado del Arte.

De acuerdo con la Norma UNE-EN 13.139 (AENOR 2003)³⁵³, los áridos utilizados en la fabricación de los diferentes morteros de esta Tesis podrían ser utilizados para los siguientes usos:

Categoría 1: Morteros para pavimentos, proyectados, para reparación, pastas: la arena lavada, y las arcillas expandidas.

Categoría 2: Morteros para revocos y enlucidos: el árido reciclado de hormigón (ARH) y el árido reciclado mixto (ARM).

Categoría 3: Morteros para albañilería: todos.

4.3.5. Módulo de finura

El módulo de finura se obtiene de calcular el porcentaje retenido y acumulado de material en los tamices 0.125-0.25-0.5-1-2-4 y 8 dividido entre 100.

MÓDULO DE FINURA (%)				
Arena lavada	ARH	ARM	Arc. exp. 2-4	Arc.exp. 3-8
2,98	3,09	2,58	5,77	6,93

Tabla 4.11: Módulo de finura de los áridos utilizados para fabricar los morteros.

Como se puede apreciar, conforme aumenta el tamaño medio del árido, mayor es el Módulo de Finura, encentrándose también de acuerdo con los parámetros recogidos en el Estado del Arte.

4.3.6. Densidad y absorción

La absorción es una de las propiedades físicas del árido reciclado que determina un comportamiento diferente de éste respecto al árido natural. La densidad del árido reciclado es inferior a la del árido natural, debido principalmente a la pasta de cemento que queda adherida a los granos.

³⁵³ AENOR (2003). "UNE-EN 13.139. Áridos para morteros".

Esta pasta adherida provoca que la textura de los áridos reciclados sea más rugosa y porosa que la de los áridos naturales, circunstancia que incide sobre la capacidad de absorción de agua.

La determinación de la densidad de las partículas se ha realizado conforme a la norma UNE-EN 1097-6 (AENOR 2001)³⁵⁴, por el procedimiento picnómetro. Este método es apropiado y se utiliza para determinar la densidad de las fracciones finas.

La muestra de ensayo preparada se sumerge en agua a $(22\pm 3)^{\circ}\text{C}$ en el picnómetro y se extraen las burbujas de aire dando vueltas y ligeros golpes al picnómetro en posición inclinada. Se mantiene la muestra dentro del picnómetro durante $(24\pm 0,5)$ horas, conservando la temperatura del agua. Al final de las 24 horas se eliminan las burbujas de aire que puedan quedar por el procedimiento anteriormente indicado.

Se rellena el picnómetro añadiendo agua y se coloca la tapa en la parte superior sin dejar burbujas en el recipiente, se seca el exterior del picnómetro y se pesa (M_2). Se retira el árido del agua y se repite la operación anterior (M_3).

La muestra ensayada se escurre en un paño seco y se extiende sobre un segundo paño cuando el primero no absorba más agua. Se deposita la muestra de árido en una bandeja en una capa uniforme, y se agita a intervalos para asegurar su secado. Para valorar si se ha alcanzado el estado de superficie seca de las partículas se utiliza un molde cónico que se rellena y se compacta mediante 25 golpes de pisón. Posteriormente, el molde se eleva, y si el cono del árido no se desmorona, se continúa el secado, repitiendo el proceso hasta que se produzca el desmoronamiento del árido al retirar el molde. Se pesa la muestra de ensayo saturada y con la superficie seca (M_1). Se seca el árido en estufa hasta masa constante (M_4).

³⁵⁴ AENOR (2001). UNE-EN 1097-6. "Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Determinación de la densidad de las partículas y la absorción de agua".

La densidad de las partículas se determina con la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

La absorción de agua tras la inmersión durante 24 h. se calcula con la siguiente fórmula:

$$W = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4}$$

La actual Instrucción del Hormigón Estructural EHE-08 (Ministerio de Fomento 2008)³⁵⁵, limita la absorción de los áridos a valores inferiores al 5%.

La mayoría de los áridos reciclados, según la bibliografía consultada, presentan una densidad aparente entre 2060 a 2650 Kg/m³. En nuestro caso, las densidades determinadas varían en función del árido reciclado de hormigón o mixto entre los valores recogidos en la Tabla 4.12.

DENSIDAD APARENTE - ABSORCIÓN		
Áridos	Densidad aparente (Kg/m ³)	Absorción (%)
Árido natural	2640	0,22 %
Árido reciclado hormigón	2400	2,40 %
Árido reciclado mixto	2450	2,49 %

Tabla 4.12: Tabla densidades aparentes y absorción de los áridos utilizados.

Como hemos recogido en el Estado del Arte, la densidad aparente para los áridos reciclados de hormigón (ARH) varía entre 2280 a 2670 Kg/m³, por lo que el árido reciclado de hormigón (ARH) estaría dentro de esos parámetros, mientras que el árido reciclado mixto (ARM) supera ligeramente los valores habituales (entre 2170 a 2400 Kg/m³).

Los resultados de absorción obtenidos también están dentro del límite del 5% establecido por la EHE08, y de acuerdo con las investigaciones referidas en el Estado del Arte.

³⁵⁵ Ministerio de Fomento (2008). "Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08".

4.3.7. Resistencia a la fragmentación

El coeficiente de desgaste de los ángeles es la diferencia entre la masa original de un árido y su masa tras ser sometido a una carga abrasiva y rechazando el material que pasa por el tamiz 1,6 mm, expresada en tanto por ciento de la masa inicial. Por lo tanto, cuanto mejor sea el comportamiento a la resistencia al desgaste de un árido, menor será su coeficiente de desgaste los ángeles.

Su determinación se realiza según la Norma UNE-83115 (AENOR 1989)³⁵⁶, preparando una muestra de peso igual o superior a 2 kg, que se fracciona utilizando los tamices 0,1 y 2 mm. El material retenido se seca en una estufa a 105°C hasta peso constante y se seleccionan 500 gr con una precisión de 2 gr.



Figura 4.8: Preparación material ensayo friabilidad.

La carga abrasiva compuesta está compuesta por 9 bolas de 30 mm, 21 bolas de 18 mm, y se completa la carga con bolas de 10 mm, de forma que el peso total de la carga sea (2.500 ± 4) gr.

Las bolas se introducen en el cilindro de ensayo, y posteriormente se añaden los 500 gr de la muestra a ensayar. Por último, se introducen también 2.500 gr de agua y se cierra el cilindro de ensayo. Se pone en movimiento el equipo Micro-Deval, con una velocidad de (100 ± 5) rpm durante 1.500 vueltas.

³⁵⁶ AENOR (1989). Norma UNE-EN 83.115. "Medida del coeficiente de friabilidad de las arenas".

A continuación, se descarga el material para su lavado sobre tres tamices superpuestos de 8 mm (para recoger la carga abrasiva), de 0,2 mm (para proteger el tamiz de 0,05 mm), y de 0,05 mm.

Se lava el conjunto bajo chorro de agua hasta que ésta salga clara y se retira el tamiz de 8 mm. Posteriormente, el material que ha quedado retenido en los tamices de 0,2 mm, y de 0,05 mm se seca en estufa a 105°C hasta peso constante.



Figura 4.9: Máquina Micro-Deval (derecha). Lavado de la muestra (izquierda).

Por último, se tamizan en seco conjuntamente los rechazos, sobre tamices de 0,2 mm y de 0,05 mm y se pesan con precisión de un gramo, tomando como referencia el material retenido en ambos tamices.

Para la determinación del coeficiente de friabilidad se aplica la siguiente fórmula:

$$F.A = \frac{m_i - m_o}{m_i} \times 100$$

RESISTENCIA A LA FRAGMENTACIÓN						
	ARENA NATURAL		ARH		ARM	
	AN1	AN2	ARH1	ARH2	ARM1	ARM2
P.inicial (gr)	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0
P.final (gr)	440,3	441,5	411,0	414,4	373,2	371,3
Cf (%)	12,0	12,0	18,0	17,0	25,0	26,0
Media (%)	12,0		17,5		25,5	

Tabla 4.13: Coeficientes de friabilidad de los áridos utilizados.

Si se comparan los valores obtenidos con los datos recopilados en el Estado del Arte, se puede observar que en este estudio los resultados son más favorables.

Todos ellos presentan valores inferiores al límite establecido por la EHE-08 del 40%, presentando la arena lavada valores inferiores, como era de esperar, a los dos tipos de áridos reciclados analizados (ARH y ARM).

En este ensayo la pérdida de peso se debe principalmente al desgaste que sufre el árido, pero en los áridos reciclados, además de este desgaste, hay que añadir el producido por el mortero adherido en el caso del árido reciclado de hormigón y el del ladrillo que acompaña el árido reciclado mixto. Ambos se pulverizan total o parcialmente en el ensayo.

4.3.8. Clasificación de los componentes del ARH fracción gruesa

La caracterización por composición se realiza únicamente para los áridos reciclados gruesos conforme a la norma UNE-EN 933-11 (AENOR 2009)³⁵⁷. En este ensayo se determina la proporción de los distintos componentes que están presentes en el árido reciclado de hormigón, como los materiales de albañilería, asfalto, vidrio, etc.

Se parte de una muestra secada a $(40\pm 5)^{\circ}\text{C}$, la cual se pesa y se registra como M_0 . Esta muestra se tamiza para separar las partículas mayores de 4 mm.



Figura 4.10: Selección de muestras y secado en horno.

³⁵⁷ AENOR (2009). UNE-EN 933-11. "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos".

Se pesa y registra la masa de las partículas retenidas por el tamiz 63 mm como M₆₃, y a continuación se rechazan.

Posteriormente, se pesa y se registra la masa de las partículas que hayan pasado por el tamiz 4 mm como M₄, y a continuación se rechaza. Se registra la masa de la porción de ensayo obtenida como M₁.

A continuación se separan la arcilla y la arena de la fracción seleccionada, y se disponen en una bandeja. El resto de la muestra se sumerge en un recipiente hermético con agua y se agita, con el objetivo de lavar los fragmentos del material y desprender las partículas flotantes.

Estas partículas flotantes se recogen y se determina su volumen V_{FL} en cm³. Se recogen las partículas no flotantes y se secan hasta peso constante.



Figura 4.11: Partículas flotantes (izq.). Volumen de partículas flotantes (dcha. y centro).

El resultado del ensayo de las partículas flotantes se recoge en la Tabla 4.14:

PARTÍCULAS FLOTANTES (cm ³ /Kg)	
Volumen inicial - V _i	152
Volumen final - V _f	148
V _{FL}	0,20

$$FL = \frac{V_i - V_f}{M} = \frac{152 - 148}{20Kg} = 0,2$$

Tabla 4.14 : Resultado ensayo partículas flotantes.

Estas partículas, una vez secas se extienden sobre una superficie plana y se separan manualmente según su composición. Se pesan y registran las masas de cada componente y los no flotantes que permanecen sin clasificar (ver Tabla 4.15).



Figura 4.12: Separación de las muestra por componentes.

COMPONENTES NO FLOTANTES DEL ARH GRUESO			
Componentes	Designación	Peso (gr)	Proporci. (%)
Arcilla arena. Metales ferrosos y no ferrosos, Madera no Flotante, Plástico, caucho y yeso	M _x	8,42	0,0421
Hormigón , productos de hormigón, Mortero, Unidades de albañilería Hormigón	M _{RC}	906,5	82,30
Áridos no tratados , piedra natural, Áridos tratados con conglomerantes hidráulicos	M _{RU}	186,42	16,92
Ladrillos tejas, Unidades de albañilería de silicato cálcico. Hormigón aireado no flotante)	M _{RB}	4,02	0,36
Materiales bituminosos	M _{RA}	0	0
Vidrio	M _{RG}	0	0

Tabla 4.15: Componentes no flotantes del ARH fracción gruesa.

Las impurezas máximas en el árido reciclado cumplen las limitaciones del Anejo 15 de la EHE-08, siendo las impurezas del material cerámico de un 0,36% cuando la limitación es del 5% del peso total de la muestra, y las impurezas de partículas ligeras y de materiales plásticos, etc. del 0,04%, cuando su límite es del 1%.

4.3.9. Mortero adherido

El análisis del Estado del Arte ha permitido analizar las ventajas e inconvenientes que presentan las distintas metodologías utilizadas, observando que la mayor parte de los trabajos de investigación consideran únicamente la fracción gruesa del árido para realizar el ensayo. Una vez analizadas las posibles estrategias a seguir, se ha decidido considerar un

método de ensayo que combine, al mismo tiempo, dos técnicas de estudio para evaluarlo en su fracción fina.

En primer lugar se ha utilizado el choque térmico, ya que es un método de análisis aplicable a cualquier tipo de árido y es fácil de realizar (Silva, Brito de et al. 2008)³⁵⁸. Además, existen resultados de otros investigadores que han utilizado este método en la fracción gruesa con áridos reciclados producidos en España (de Juan and Gutiérrez 2009; Pelufo, Domingo Cabo et al. 2009)³⁵⁹³⁶⁰, por lo que es posible establecer comparaciones al respecto. Después de realizada esta técnica, a los mismos áridos reciclados se les ha sometido al ensayo con ácido clorhídrico.

El procedimiento del ensayo con ácido clorhídrico se describe a continuación: se parte de una muestra de material, la cual se cuartea para obtener dos muestras aproximadamente iguales. Posteriormente se tamizan con un cedazo de 2 mm de luz de malla y se selecciona el material retenido. Esta fracción del material se lava para eliminar el polvo adherido.



Figura 3.14: Muestras a ensayar en seco (derecha) y después de su lavado (izquierda).

³⁵⁸ Silva, J., J. Brito de, et al. (2008). "Fine ceramics replacing cement in mortars. Partial replacement of cement with fine ceramics in rendering mortars." *Materials and Structures* 41: 1333-1334.

³⁵⁹ de Juan, M. S. and P. A. Gutiérrez (2009). "Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate." *Construction and Building Materials* 23(2): 872-877

³⁶⁰ Pelufo, M., A. Domingo Cabo, et al. (2009). Analysis of moisture state of recycled coarse aggregate and its influence on compression strength of the concrete. *Evolution and Trends in Design. Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures*. U. P. d. Valencia.

Después del lavado se introduce en estufa a 105°C hasta obtener un peso constante. Las muestras se sumergen en agua y se introducen en frigorífico a una temperatura de 0°C durante dos horas, para saturar el mortero adherido, ya que presenta una mayor absorción que el árido.

Posteriormente se somete a altas temperaturas en una mufla, alcanzando los 500°C durante dos horas, infiriendo una rápida evaporación para generar tensiones que faciliten la separación del mortero adherido. Inmediatamente después se extraen de la mufla y se sumergen en agua fría, favoreciendo también con el cambio brusco de temperatura la separación de la interfase mortero-árido.

Dado el tamaño de las muestra a analizar (2-4 mm), una gran cantidad de mortero permanece adherido, por lo que, para facilitar su separación se golpea y se rasca manualmente de forma uniforme con una maza de goma.

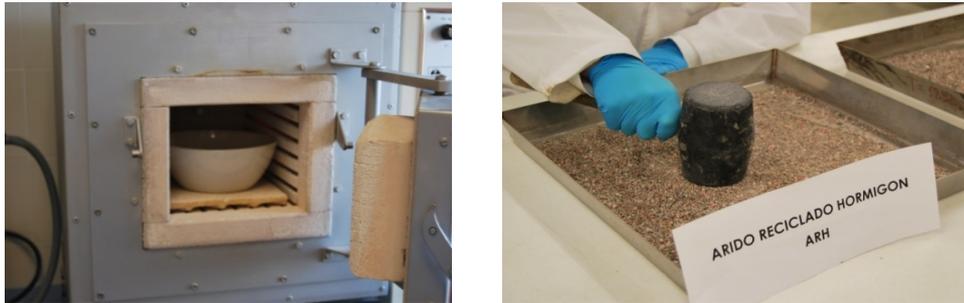


Figura 3.15: Introducción muestra mufla (dcha.). Separación mortero adherido (izq.).

Una vez separada la mayor cantidad de mortero adherido, se pesa y tamiza de nuevo por el tamiz de 500 micras, tomando la cantidad de material que queda retenido.

Esta fracción del material se sumerge en una disolución de ácido clorhídrico 1:9 durante 48 horas. Seguidamente se lava con agua y se vuelve a sumergir en una disolución de ácido clorhídrico 1:3, durante otras 48 horas, quedando el árido prácticamente exento de mortero adherido.



Figura 3.16: Vertido de la disolución de ácido clorhídrico sobre las muestras.

No obstante, en todas las muestras ensayadas se observó que después de terminado el ciclo de exposición al ácido clorhídrico, seguía existiendo mortero adherido al árido, por lo se decidió volver a introducir la muestra de nuevo otras 48 horas más en otra disolución de ácido clorhídrico 1:3.

Una vez comprobada la ausencia de mortero adherido, se procede al lavado de las muestras y secado en estufa a 105°C, hasta peso constante.

Los resultados de los ensayos realizados para determinar el mortero adherido de los áridos reciclados utilizados se representan en la Tabla 4.16.

MORTERO ADHERIDO DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS				
	ARH		ARM	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
P. muestras (gr)	523,90	535,80	424,50	426,90
P. choq. térmi. cribado (gr)	433,00	463,10	409,70	412,90
P. después ácido (gr)	173,10	166,20	203,20	210,80
P. mortero adherido (gr)	350,80	369,60	206,50	202,10
Mortero adherido (%)	66,96%	68,98%	52,13%	50,62%
Media	67,97%		56,38%	

Tabla 4.16: Mortero adherido de los áridos reciclados.

Los resultados están en consonancia con los recogidos en el Estado del Arte, donde para la fracción 4-8 mm, la cantidad de mortero adherido era del 60%. También observamos que el árido reciclado mixto (ARM), posee una menor cantidad de mortero adherido debido a su composición y la existencia de otros materiales (madera, cerámicos, etc.).

4.3.10. Composición química de los áridos

Se ha utilizado la técnica analítica de Difracción de Rayos X (DRX) para determinar cualitativamente la composición mineralógica de los diferentes áridos utilizados, tanto del árido natural (AN), como los dos tipos de áridos reciclados utilizados: el árido reciclado de hormigón (ARH) y el árido reciclado mixto (ARM).

Para ello se ha utilizado un difractómetro PHILIPS PW 180, que determina la cantidad de componentes mineralógicos en forma de óxidos.



Figura 4.13: Aparato de difracción de rayos X.

Con la espectroscopia de fluorescencia electromagnética, obtenemos la composición química de los diferentes áridos de forma cuantitativa, y en forma de óxidos, que se refieren Tabla 4.17.

ANÁLISIS QUÍMICO DE LOS DIFERENTES ÁRIDOS UTILIZADOS (%)			
Elementos	AN	ARH	ARM
Si O ₂	95,29	56,53	67,66
Al ₂ O ₃	1,14	2,16	5,02
K ₂ O	0,97	1,32	2,02
Fe ₂ O ₃	0,57	1,10	1,50
Ti O ₂	0,12	0,10	0,28
Ca O	0,07	37,4	22,08
Mg O	0,03	0,08	0,88
Otros	1,81	1,31	0,55

Tabla 4.17 : Análisis químico de los diferentes áridos utilizados.

Como puede apreciarse, el componente esencial mayoritario de los áridos analizados es la sílice, con valores superiores en el árido natural. Los áridos

recicladados presentan valores muy cercanos a los referidos en el Estado del Arte.

En los áridos reciclados el segundo componente más abundante es el óxido de calcio, debido al cemento y la pasta adherida. También existen importantes cantidades de óxidos de aluminio y de óxidos de hierro, que probablemente tenga su origen en el cemento, y que junto a los demás óxidos determinan el color a los áridos reciclados.

4.3.11. Cloruros soluble en agua - Método Volhard

Los áridos reciclados de hormigón suelen presentar un contenido apreciable de cloruros, en función de la procedencia del hormigón usado como materia prima. La concentración de cloruros es especialmente elevada en áridos reciclados que provienen de obras marítimas o de pavimentos expuestos a las sales para el deshielo, aunque también es significativa en el caso de los hormigones que contienen aditivos acelerantes de fraguado

La determinación de los cloruros solubles en agua se realiza conforme a la norma UNE 1744-Apartado 7 (AENOR 2010)³⁶¹. Par ello se añade una disolución de nitrato de plata a otra disolución que contenga los iones de cloruro. La proporción de la disolución de nitrato de plata que no ha reaccionado se valora por retroceso con una disolución patrón de tiocianato de potasio utilizando como indicador una disolución de sulfato de amonio y hierro.

Se parte de una muestra de árido secado a una temperatura de $(110\pm 5)^{\circ}\text{C}$, que se deposita en una botella. Se pesa y se registra su masa.

Se añade agua a cada botella con una masa igual a la de la muestra ensayada, y se agitan mediante 60 minutos mediante un agitador de sacudidas.

³⁶¹ AENOR (2010). UNE-EN 1744-1. "Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Análisis químico".

A continuación se vierten los extractos haciéndolos pasar a través de filtros de textura media, hasta conseguir al menos 100 ml del filtrado con un tono claro o ligeramente opalescente.

Con la ayuda de una pipeta se toman 100 ml del extracto filtrado y se transfieren a un matraz Erlenmeyer de 250 ml de capacidad. Se añaden 5 ml de ácido nítrico y, a continuación, la disolución de nitrato de plata contenida en la bureta hasta que se produzca la precipitación completa de todos los cloruros.



Figura 4.14: Muestras de los áridos (derecha). Botellas con áridos y agua (Izquierda).



Figura 4.15: Muestras sacada agitador (derecha).Filtrado de muestras (izquierda).

Posteriormente se añade una cantidad adicional de nitrato de plata. La disolución se calienta durante 5 minutos a una temperatura por justo por debajo del punto de ebullición y luego se deja enfriar. Se añade de nuevo nitrato de plata y se registra su volumen como V_5 .

A continuación se introducen 2 ml de trimitil-1-hezanol, se tapa el matraz y se agita vigorosamente para coagular el precipitado. Después se le añaden 5 ml de sulfato de amonio y se valora con la disolución patrón de tiocianato de potasio contenida en la bureta C_T , hasta que se produzca el primer cambio

permanente de color (de blanco opalino a marrón oscuro) y la disolución tenga la misma intensidad de color que la utilizada como patrón, registrando el volumen consumido de la disolución de tiocianato de potasio (V_6).

El contenido en iones de cloruro C del árido se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$C = 0.003\ 546\ W\ [V_5 - (10\ C_T\ V_6)]\ (\text{en } \%)$$

Siendo:

V_5 es el volumen de la disolución de nitrato de plata (ml).

V_6 es el volumen añadido a la disolución patrón de tiocianato de potasio (ml).

C_T es la concentración de la disolución patrón de tiocianato de potasio (mol/ml).

W es la relación agua/árido (gr/gr).

Los resultados se expresan en la Tabla 4.18.

CONTENIDO EN IONES DE CLORURO – MÉTODO VOLHARD				
	Árido reciclado hormigón		Árido reciclado mixto	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
P. muestra (gr)	275,10	268,20	286,50	276,90
V_5 (ml)	10,00	10,00	10,00	10,00
V_6 (ml)	9,70	9,70	6,50	6,50
C_T (mol/ml)	0,1004	0,1004	0,1004	0,1004
W (gr/gr)	1	1	1	1
C	0,0005%	0,0005%	0,00062%	0,00062%

Tabla 4.18: Contenido en iones de cloruro soluble en agua- Método Volhard.

Como se puede comprobar, estos han dado valores de contenido en cloruros solubles en agua comprendidos entre los límites que establece la Instrucción de Hormigón Estructural EHE08 (0,05% para el hormigón armado y del 0,15% para hormigones en masa); así como el límite más restrictivo que

establece la norma UNE-EN 998-2 (AENOR 2011)³⁶² para morteros que contienen refuerzos metálicos.

De igual forma, los cloruros solubles en agua son inferiores a los recogidos en los estudios consultados en el Estado del Arte, cuyos valores se encuentran comprendidos entre 0,00% y 0,053%.

4.3.12. Pérdidas por calcinación

La determinación de las pérdidas por calcinación se realizan según la norma UNE 17744 - Apartado 17 (AENOR 2010)³⁶³, mediante la calcinación del árido en el aire en una temperatura de $(975 \pm 25)^\circ\text{C}$, con el objeto de eliminar el dióxido de carbono y el agua no evaporada durante el secado, junto con todos los elementos volátiles oxidables presentes.

En primer lugar se seca la muestra a una temperatura de $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ y posteriormente se muele, reduciendo la muestra por etapas hasta obtener una masa de aproximadamente de 20 gr. Esta fracción seleccionada se tritura hasta que todas sus partículas pasen a través de un tamiz de 125 μm .

Se selecciona una masa de (1 ± 5) gr como probeta de ensayo y se introduce la muestra en un crisol que previamente se ha calcinado y pesado. El crisol y la muestra se introducen en un horno a una temperatura de $(975 \pm 25)^\circ\text{C}$, durante al menos 60 minutos. Posteriormente, se deja enfriar a temperatura ambiente y se pesa.

Las pérdidas por calcinación se calculan mediante la siguiente ecuación y los resultados obtenidos se representan en la Tabla 4.19.

$$\text{Pérdidas por calcinación} = \frac{m_{13} - m_{14}}{m_{13}}$$

³⁶² AENOR (2011). UNE-EN 998-2. "Especificaciones para morteros de albañilería. Parte 2: Morteros de albañilería".

³⁶³ AENOR (2010). UNE-EN 1744-1. "Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Análisis químico".

Siendo:

m_{13} la masa inicial de la muestra de ensayo en gr.

m_{14} la masa inicial de la porción de ensayo calcinada gr.

PÉRDIDAS POR CALCINACIÓN DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS				
	Árido reciclado hormigón		Árido reciclado mixto	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
P. crisol (gr)	33,0843	36,2967	33,4930	33,6962
P. muestra (gr)	0,9874	0,9910	1,0161	1,0412
M 13 (gr)	34,0717	37,2877	34,5091	34,7374
M 14 (gr)	33,9046	37,1180	34,3513	34,5739
Pérdidas (%)	0,4904	0,4551	0,4573	0,4707
Media	0,4728 %		0,4640 %	

Tabla 4.19: Pérdidas por calcinación de los áridos reciclados.

Como ya se analizó en el Estado del Arte, la pérdida por calcinación no es una especificación propia de los áridos reciclados, y no está limitada por ninguna normativa, salvo por la Guide Specifications for Recycled Aggregates in Concrete Construction australiana (Sagoe-Crentsil 1998)³⁶⁴; en la que este parámetro se considera sólo para evaluar la respuesta de los componentes de los áridos reciclados frente a altas temperatura. Como puede observarse, los resultados obtenidos son muy inferiores a los recogidos en los estudios consultados en el Estado del Arte (2,6% - 12,9%)

4.3.13. Sulfatos solubles en agua en áridos reciclados

El contenido en sulfatos puede ser muy variable en los áridos reciclados, sobre todo en los mixtos, dependiendo de las características del material de origen, del procesamiento utilizado en la planta de reciclaje y de la presencia de contaminantes, como el yeso cuando el material proviene de edificación.

³⁶⁴ Sagoe-Crentsil, K. and T. Brown (1998). Guide for Specification of Recycled Concrete Aggregates (RCA) for Concrete Production. CSIRO, Building, Construction and Engineering.

La determinación de los sulfatos solubles en agua en áridos reciclados se realiza según la norma UNE 17744 - Apartado 10.2 (AENOR 2010)³⁶⁵. El método de ensayo establece la mezcla de una probeta de árido reciclado con agua caliente, con el objetivo de facilitar la extracción de los iones de sulfato solubles en agua. A la mezcla se le añade cloruro de bario, tamponado a pH neutro, de tal forma que los iones sulfato precipitan en forma de sulfato de bario. A continuación, se determina el contenido de sulfatos solubles en agua por espectrofotometría.

Se prepara una muestra de árido reciclado de tamaño inferior a 4 mm, que se introduce en un vaso de precipitados marcado. Para la preparación de los extractos se pesan (1.000 ± 5) gr de agua destilada, previamente calentada a una temperatura de $(60 \pm 5)^\circ\text{C}$, que se añade a la muestra de árido reciclado y se cubre mediante vidrio reloj. Se remueve el contenido del vaso de precipitados durante (15 ± 1) minutos con un agitador magnético, manteniéndolo a una temperatura de $(60 \pm 5)^\circ\text{C}$.

Inmediatamente después se filtran (200 ± 50) ml de la disolución extraída mediante filtro rápido y se vierte sobre un vaso de precipitados. Se tampona la disolución filtrada con ácido nítrico hasta obtener un pH de (7 ± 1) .

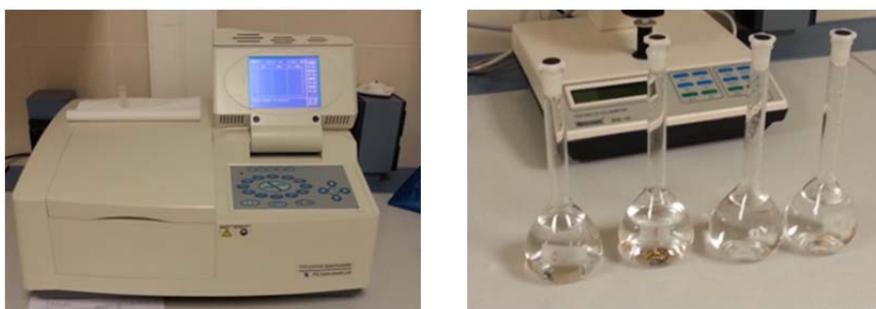


Figura 4.16: Disoluciones y espectrofotómetro.

Sobre esta disolución se le añade el cloruro de bario y se agita vigorosamente durante 30 segundos y se deja reposar 5 minutos. Se agita de

³⁶⁵ AENOR (2010). UNE-EN 1744-1. "Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Análisis químico".

nuevo el tubo de ensayo durante 10 segundos hasta que los cristales de $BaSO_4$ se pongan en suspensión.

Se deja reposar 15 segundos para permitir que las burbujas de aire se dispersen y se registra la lectura del espectrofotómetro de CSO_4 en mg/l.

El contenido en sulfatos solubles SO_4 en agua se calcula empleando la siguiente ecuación:

$$T SO_4 = \left[((C_{SO_4} - C_0) / 10.000) \frac{P}{P'} \right] - C_{H_2O}$$

Siendo:

TSO_4 contenido en sulfatos solubles en agua de las muestra (%).

C_{SO_4} contenido en sulfatos solubles en agua de las muestra (%).

C_0 resultado del espectrofotómetro obtenido en el ensayo en blanco.

CH_2O resultado del espectrofotómetro obtenido para el agua.

P masa de agua empleada en el filtrado de la muestra (gr).

P' masa de la porción del ensayo (gr).

SULFATOS SOLUBLES EN AGUA				
	Árido reciclado hormigón		Árido reciclado mixto	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
CSO_4 (gr)	1622,81	2023,50	1780,46	1781,97
C_0	55,87	55,87	55,87	55,87
CH_2O	47,21	47,21	47,21	47,21
P (gr)	24,90	24,90	25,10	24,90
P' (gr)	1000	1000	1000	1000
$T SO_4$ (%)	6,27	7,87	6,86	6,87
Media	7,07 %		6,865 %	

Tabla 4. 20: Contenido en sulfatos solubles en agua.

Como ya se comentó en el Estado del Arte el contenido en sulfatos es un factor crítico, ya que los valores obtenidos exceden ampliamente los límites establecidos y superan las referencias encontradas de la Normativa, Guías y estudios consultadas en el Estado del Arte. El exceso de sulfatos de los áridos reciclados ensayados puede deberse tanto a la pasta de cemento adherida como al contenido en yeso (que puede resultar reactivo), por lo que será necesario estudiar en profundidad su influencia real sobre las propiedades de los morteros de los que formen parte.

4.3.14. Sulfatos solubles en ácido

El contenido en compuestos totales de azufre del árido reciclado se debe a la presencia de yeso y, en menor medida, al mortero o a las impurezas que presenta el árido.

El contenido en sulfatos se considera perjudicial por las reacciones expansivas del cemento, afectando a la durabilidad de los hormigones y morteros. La presencia del yeso en los áridos reciclados mixtos es una evidencia contrastada por las referencias obtenidas en el Estado del Arte, al ser este un material muy utilizado en construcción.

La determinación de los sulfatos soluble en ácido se realiza según la norma UNE 17744 - Apartado 12 (AENOR 2010)³⁶⁶. Los sulfatos presentes en los áridos reciclados se extraen empleando una disolución de ácido clorhídrico diluido, determinado su valoración por gravimetría y expresando el resultado en tanto por ciento sobre la masa del árido.

Se toma una muestra previamente desecada a $(110\pm 5)^{\circ}\text{C}$, y se muele, seleccionando una masa aproximada de 20 gr. A continuación se tritura y se tamiza a través del tamiz de 125 μm , y se seleccionan 8 gramos de la pasa para el ensayo.

³⁶⁶ AENOR (2010). UNE-EN 1744-1. "Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Análisis químico".

La muestra seleccionada se pesa (m_6), ajustando a los 0,1 gr, y se introduce en 360 ml de agua y 40 ml ácido clorhídrico concentrado, calentándolo sobre una matraz Erlenmeyer hasta su ebullición.

Después se retira del calor y, mientras se agita, se rocía con la disolución ácida, manteniéndola durante (15 ± 1) minutos a una temperatura ligeramente inferior a la de ebullición.

Se retira el residuo haciéndolo pasar a través de un filtro de grado medio y el material retenido se deposita en un vaso de precipitados, lavándolo con agua caliente desmineralizada. Se comprueba la ausencia de iones de cloruro en el agua de lavado (ensayo con nitrato de plata).

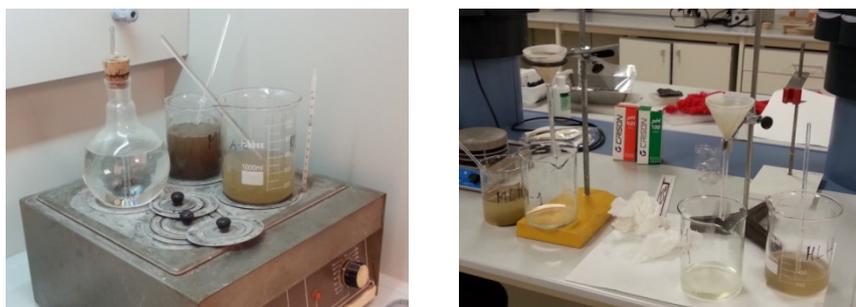


Figura 4.16: Calentando muestras a punto de ebullición. Filtrado de la muestra.

Posteriormente se lava el filtro y su contenido con unos mililitros de agua y se recoge el filtrado en un tubo de ensayo, al que se añaden posteriormente unas gotas de ácido nítrico concentrado y la disolución previamente realizada de nitrato de plata. Se comprueba la ausencia de turbidez o de precipitado en la disolución, indicativo de que el agua de lavado no posee iones de cloruro.

Se ajusta el volumen a unos 600 ml con agua desmineralizada y se calienta el vaso de precipitados hasta una temperatura por debajo del punto de ebullición.

Se prepara la disolución alcalina mediante la adición de hidróxido de amonio y se comprueba su alcalinidad empleando rojo de metilo como indicador.

Se hierve a fuego lento durante 30 segundos y se cuela empleando un filtro de porosidad media. Se lava el contenido del filtro, al menos tres veces

con un poco de agua caliente desmineralizada, reservándose el filtrado y rechazando el precipitado.

Se acidifican los filtrados y las aguas de lavado mediante ácido clorhídrico hasta obtener un color rojo como el indicador.

Se lleva a ebullición y se deja hervir durante $(5 \pm 0,5)$ minutos y se comprueba que la disolución este clara. Si no lo está, se inicia de nuevo el ensayo empleando una nueva muestra de árido.



Figura 4.17: Comprobación alcalinidad y filtrado final.

Durante la ebullición se añaden lentamente 40 ml de una disolución de cloruro de bario (100 gr de cloruro de bario en 1 litro de agua) y se cuele haciéndolo pasar a través de un filtro medio agitando vigorosamente y manteniendo la temperatura justo por debajo del punto de ebullición. Se deja reposar, se filtra y se calcina el precipitado de sulfato de bario (m_7).

El contenido en sulfatos solubles en ácido del árido se determina mediante la siguiente ecuación:

$$SO_3 = \frac{m_7}{m_6} \times 34.30 \text{ (en \%)}$$

Siendo:

m_6 la masa del precipitado (gr).

m_7 la masa de la porción de ensayo (gr).

SULFATOS SOLUBLES EN ÁCIDO				
	Árido reciclado hormigón		Árido reciclado mixto	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
M. ensayo m_6 (gr)	7,9987	7,9986	8,0011	8,0013
Peso crisol (gr)	32,7127	37,3867	33,7607	34,3775
P.crisol+material (gr)	32,8315	37,5026	34,9385	35,5857
M. precipit. m_7 (gr)	0,1188	0,1159	1,1778	1,2082
Contenido SO_3 (%)	0,51%	0,50%	5,05%	5,18%
Media	0,505 %		5,115 %	

Tabla 4.21: Contenido en sulfatos solubles en ácido de los áridos reciclados.

El contenido en sulfatos solubles en ácido de los áridos que vayan a ser utilizados en hormigón debe ser inferior al 0,8%, de acuerdo con la EHE-08.

Como ya se comentó en el Estado del Arte, el contenido en sulfatos también es un factor crítico, ya que los valores obtenidos exceden ampliamente los límites establecidos. De acuerdo con los valores obtenidos, el árido reciclado de hormigón (ARH) cumple los límites, mientras que el árido reciclado mixto (ARM) los supera. Los estudios consultados muestran también esta tendencia, probablemente justificada por la contaminación de los residuos, circunstancia que obliga a estudiar con más profundidad su influencia real sobre las propiedades de los morteros fabricados con estos áridos.

4.3.15. Contaminantes ligeros

La determinación de los contaminantes ligeros que afectan al acabado superficial se realizan según la norma UNE 17744 - Apartado 14.2 (AENOR 2010)³⁶⁷ el objetivo de este ensayo es determinar la existencia de partículas ligeras en los áridos, tales como lignito, carbón, etc., que puedan producir en los hormigón o morteros manchas o ampollas en el acabado superficial.

³⁶⁷ AENOR (2010). UNE-EN 1744-1." Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Análisis químico".

Para la realización del ensayo se parte de una muestra de 5kg, que se reduce mediante cuarteo hasta obtener una masa de (350 ± 50) gr. La fracción seleccionada se extiende sobre una bandeja y se seca hasta masa constante en estufa a $(110\pm 5)^{\circ}\text{C}$, y se determina su masa hasta peso constante (m_9). Se separa el árido haciéndolo pasar por una tamiz de $300\ \mu\text{m}$ y se rechaza la fracción más fina.

Posteriormente se vierte un litro de cloruro de cinc en un vaso de precipitados de 2 litros, y a continuación se introduce el árido en la disolución. Se agita el lecho del árido con una varilla de vidrio para facilitar que las partículas asciendan hasta la superficie.

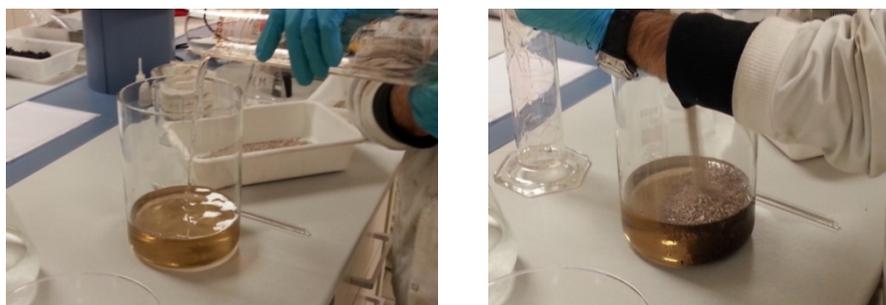


Figura 4.18 : Cloruro de cinc y vertido de árido sobre el cloruro de cinc.

Se lava el tamiz y las partículas retenidas en el mismo con agua hasta eliminar la disolución de cloruro de cinc. Se seca el tamiz y su contenido durante (20 ± 4) h, a una temperatura de $(40\pm 5)^{\circ}\text{C}$, y a continuación se vierte el contenido en una cabina de evaporación, completando el secado a una temperatura de $(110\pm 5)^{\circ}\text{C}$ durante (4 ± 0.25) h.



Figura 4.19: Decantado de precipitados y partículas retenidas.

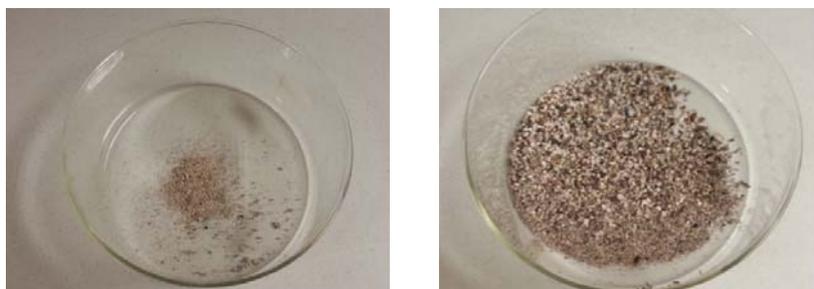


Figura 4.20: Decantado y partículas resultantes.

Por último se deja enfriar la capsula y a continuación se pesan las partículas ligeras (m_{10}). El resultado del ensayo se recoge en la Tabla 4.22.

CONTAMINANTES LIGEROS				
	Árido reciclado hormigón		Árido reciclado mixto	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
P. material m ₉ (gr)	384,50	407,10	406,2	360,10
P. partíc. ligeras (gr)	2,50	2,45	12,00	10,90
Partículas ligeras (%)	0,65%	0,60%	2,95%	3,03%
Media	0,62 %		2,99 %	

Tabla 4.22: Porcentaje de contaminantes ligeros.

Las limitaciones para las partículas ligeras oscilan entre 0,2% al 1%, por lo que, como se puede apreciar, los resultados obtenidos para el árido reciclado de hormigón (ARH) estarían dentro de estas referencias, mientras que en el caso del árido reciclado mixto (ARM) las superarían ampliamente, aunque según estudios realizados (Alaejos and Sánchez de Juan 2004)³⁶⁸, se pueden alcanzar valores del 5,85%.

³⁶⁸ Alaejos, M. P. and M. Sánchez de Juan (2004). Utilization of recycled concrete aggregate for structural concrete. Conference on the use of recycled materials in building and structures. RILEM. Barcelona.

4.3.16. Solubilidad en agua

La determinación de la solubilidad en agua se realiza según la norma UNE 17744 - Apartado 16 (AENOR 2010)³⁶⁹. Para su realización se selecciona una muestra del árido mediante cuarteo (m_{11}), y se introduce en una botella junto con una masa de agua igual al doble de la masa de la probeta de ensayo. A continuación se pesan el conjunto botella-contenido, y se determina la masa del árido mediante la diferencia de pesos de cada botella (m_{11}).

Las botellas se cierran herméticamente y se mezcla homogéneamente su contenido por medio de un agitador de sacudidas durante 24 h. como mínimo.



Figura 4.21: Muestras de árido del ensayo de solubilidad de agua.

Los extractos se filtran haciéndolos pasar a través de papeles de filtro de textura media secos hasta que al menos se obtengan 100 ml de filtrados claros en vasos de precipitados limpios. El líquido sobrenadante se pasa a través de un filtro de textura media, previamente tarado.

El árido decantado se transfiere a otro recipiente previamente tarado, con la ayuda de una mínima cantidad de agua.

Se seca y se enfría el contenido del recipiente hasta masa constante y, posteriormente, se pesa.

Se calcula la masa del árido seco, restando al valor anterior las masas del recipiente y del papel del filtro (m_{12}).

³⁶⁹ AENOR (2010). UNE-EN 1744-1. "Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Análisis químico".

La solubilidad en agua del árido se determina mediante la siguiente ecuación:

$$W_s = \frac{m_{11} - m_{12}}{m_{11}} \times 100 \text{ (en \%)}$$

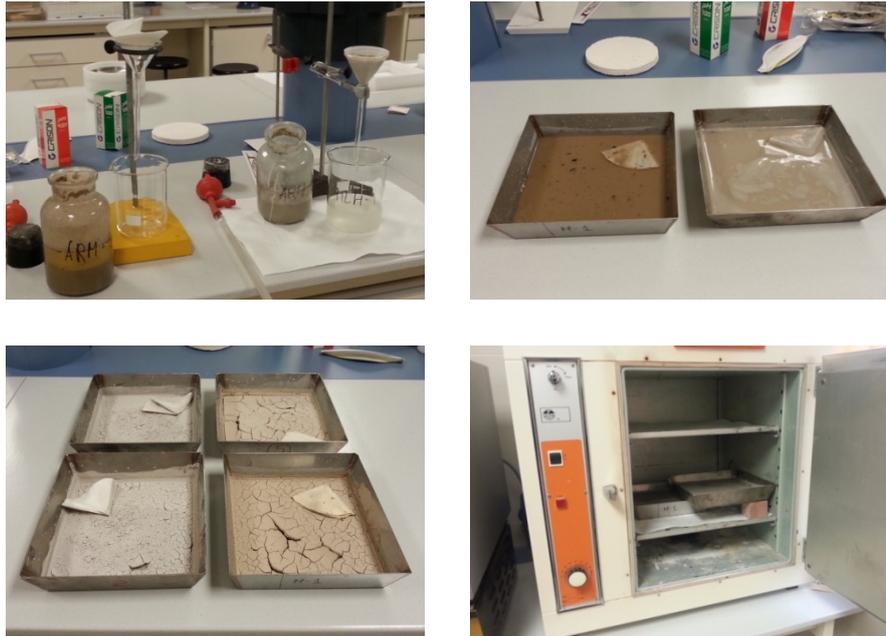


Figura 4.22: Filtrado de los precipitados y recipiente con árido decantado.

SOLUBILIDAD EN AGUA DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS				
	Árido reciclado hormigón		Árido reciclado mixto	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
P. árido m_{11} (gr)	232,30	229,70	206,40	206,90
Peso agua (gr)	466,10	459,20	412,70	413,80
Peso filtro (gr)	1,328	1,230	1,228	1,295
Mat.+filtro+bandeja (gr)	1297,80	861,83	1506,63	1511,70
Después horno (gr)	1529,80	860,30	1506,20	1511,40
P. material disuelto (gr)	-1,628	-1,530	-0,428	-0,295
P. árido extraído m_{12} (gr)	230,67	228,17	205,97	206,61
Solubilidad (%)	0,70%	0,67%	0,21%	0,14%
Media	0,68 %		0,17 %	

Tabla 4.23: Solubilidad en agua de los áridos reciclados.

4.3.17. Contenido en materia orgánica

La determinación del contenido orgánico que puedan afectar al fraguado y endurecimiento de los morteros (contenido en humus), se realiza según la norma UNE 17744 - Apartado 15 (AENOR 2010)³⁷⁰. El contenido en humus de un árido se determina por el color que aparece en una porción de ensayo sobre una disolución de hidróxido de sodio.

El humus desarrolla un color oscuro cuando reacciona con el hidróxido de sodio, siendo la intensidad del color el parámetro que referencia la cantidad de humus existente.

De esta forma, si la disolución no oscurece o lo hace ligeramente indica que no contiene cantidades significativas de humus, mientras que un color fuerte es consecuencia de un contenido elevado.

Se parte de una muestra desecada en la estufa a una temperatura de $(40\pm 5)^{\circ}\text{C}$, y de una disolución de NaOH al 3%. El hidróxido de sodio se vierte en una botella de vidrio hasta alcanzar una altura de 80 mm.

A continuación se vierte la muestra en la botella hasta que la altura del árido y del ácido alcance los 120 mm. Posteriormente se agita la botella para eliminar las burbujas de aire.

Se tapa la botella, se sacude vigorosamente durante 1 minuto y se deja reposar durante 24 horas. Transcurrido ese tiempo se compara el color de la disolución con la disolución patrón.

Como se aprecia en la Figura 4.26 la disolución patrón (izquierda) presenta un color más oscuro que el obtenido con el árido reciclado de mixto (ARM) (centro) y con el árido reciclado de hormigón (ARH) (derecha), por lo que se

³⁷⁰ AENOR (2010). UNE-EN 1744-1." Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Análisis químico".

puede afirmar que no contienen materia orgánica, circunstancia habitual en este tipo de áridos (Barbudo, Agrela et al. 2012)³⁷¹.



Figura 4.23: Contenido en humus.

4.4. AGUA

El agua utilizada es potable, suministrada por la empresa municipal Aguas de Burgos S.A., dependiente del Excmo. Ayuntamiento de Burgos.

Este agua proviene de las estribaciones de la Sierra de la Demanda (Sistema Ibérico) y es acondicionada en la Estación de Tratamiento de Agua Potable de Arlanzón, desde donde se canalizada a la ciudad de Burgos.

En la Tabla 4.24, se recogen los parámetros de caracterización del agua utilizada, de acuerdo con lo establecido en el RD 140/2003, facilitados por la Sociedad Aguas de Burgos S.A.

³⁷¹ Barbudo, A., F. Agrela, et al. (2012). "Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications." *Construction and Building Materials* 28(1): 129-138.

ANÁLISIS DEL AGUA			
Elementos	Unidades	Resultados	Valor máx. permitid.
Olor		0	3 a 25ª C
Sabor		0	3 a 25ª C
Color		< 1,0	15
pH		8,04	6,5 < pH < 9,5
Turbidez	UNF	0,2	1
Conductividad	mg/l	112.2	2.500
Nitratos	mg/l	< 5,0	50
Nitritos	mg/l	< 0,05	0,1
Amonio	mg/l	< 0,10	0,5
Cloruro libre residual	mg/l	0,50	1,0
Fluoruro	mg/l	< 0,10	1,5
Sodio	mg/l	2,1	200
Cloruro	mg/l	< 10	250
Sulfato	mg/l	< 10	250
Calcio	mg/l	18,2	-
Dureza total	°F	5,0	-
Bicarbonato	mg/l	56,1	-
Hierro	mg/l	< 0,05	0,2
Aluminio	mg/l	0,04	0,2
Cobre	mg/l	< 0,005	2,0
Suma trihalometanos	mg/l	< 0,025	0,1
Índice de Langelier		- 0,4	- 0.5 < l l < + 0,5
Clostridium perfringens	UFC 100 ml	0	0
Bacterias coliformes	UFC 100 ml	0	0
Recuento colonias 22° C	UFC 1 ml	3	100

Tabla 4.24: Análisis del agua de Burgos s/ RD 140/2003 en el año 2.013.

4.5. ARCILLA EXPANDIDA

La arcilla expandida utilizada en este trabajo ha sido suministrada por la empresa Argex. Se trata de un árido ligero de arcilla que se expande en un Horno Rotatorio a 1.200°C de temperatura. De entre los distintos tamaños que la empresa comercializa se han seleccionado el Tipo 2-4 y el Tipo 3-8F.

La elección de estas dos granulometrías se ha realizado tomando como referencia las dosificaciones utilizadas en el trabajo de investigación de título “Morteros aligerados con arcilla expandida: Influencia de la granulometría y la adición de fibras de vidrio AR en el comportamiento mecánico” (Río Merino, Santa Cruz Astorqui et al. 2.005)³⁷².

Las propiedades de la arcilla expandida utilizada, de acuerdo con las referencias básicas facilitadas por el fabricante, son las siguientes:

ARCILLA EXPANDIDA			
Características	Unidades	2 - 4	3 - 8F
Resistencia fragmentación	MPa	4,8	2,2
Densidad aparente seca	Kg/m ³	358 (+/- 15%)	331 (+/- 15%)
Clases granulométricas real	mm	4,0 – 8,0	6,3 – 12,5
Partículas machadas	% masa	-	6
Conductividad térmica	W/m °C	0,11	0,11
Absorción de agua	% masa seca	26,5	24,5
Resistencia al fuego		A1	A1
Resistencia a compresión	MPa	4,8 (+/- 10%)	2,2 (+/- 10%)
Utilización		Hormigón ligero	Hormigón ligero

Tabla 4.25: Características técnicas de la arcilla expandida.

También se ha determinado las granulometrías de cada uno de los dos tipos de arcilla expandida utilizados en este estudio (Tabla 4.26).

³⁷² Río Merino, M. d., J. Santa Cruz Astorqui, et al. (2.005). Morteros aligerados con arcilla expandida: Influencia de la granulometría en la adición de fibras de vidrio AR en el comportamiento mecánico.

GRANULOMETRÍA - ARLITA 2-4						
Tamiz mm	Retenido (gr)		% Retenido		% Pasa	
	Parcial	Acumul.	Parcial	Acumul.	Parcial	Acumul.
8,000	0	0,00	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%
4,000	755,20	755,20	77,73%	77,73%	22,27%	22,27%
2,000	212,30	967,50	21,85%	99,58%	78,15%	0,42%
1,000	3,90	971,40	0,40%	99,98%	99,60%	0,02%
0,500	0,20	971,60	0,02%	100,00%	99,98%	0,00%
0,250	0,00	971,60	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%
0,125	0,00	971,60	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%
0,063	0,00	971,60	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%
Filler	0,00	971,60	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%
	971,60		100,0%			
Porcentaje de finos (f)			0,00%	1,67		
Módulo Finura (MF)			5,77%			

GRANULOMETRÍA - ARLITA 3-8F						
Tamiz mm	Retenido (gr)		% Retenido		% Pasa	
	Parcial	Acumul.	Parcial	Acumul.	Parcial	Acumul.
8,000	953,8	953,80	93,32%	93,32%	6,68%	6,68%
4,000	68,2	1022,10	6,67%	99,99%	93,33%	0,01%
2,000	0,10	1022,10	0,01%	100,00%	78,15%	0,00%
1,000	0,00	1022,10	0,00%	100,00%	99,99%	0,00%
0,500	0,00	1022,10	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%
0,250	0,00	1022,10	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%
0,125	0,00	1022,10	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%
0,063	0,00	1022,10	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%
Filler	0,00	1022,10	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%
	1022,10		100,00%	1022,10		100,00%
Porcentaje de finos (f)			0,00%	1,67		
Módulo Finura (MF)			6,00%			

Tabla 4.26: Granulometrías arcillas expandidas utilizadas.

CAP. V PROGRAMA EXPERIMENTAL

Capítulo 5: PROGRAMA EXPERIMENTAL

5.1. METODOLOGÍA

Con la bibliografía recogida en el Estado del Arte, como referencia del conocimiento científico existente, se planificó una metodología experimental para analizar el comportamiento de los morteros ligeros fabricados con áridos reciclados.

El objetivo final de esta Tesis es el desarrollo de un proceso experimental para el diseño de morteros ligeros fabricados con áridos reciclados finos procedentes de escombros de hormigón y mixtos.

En primer lugar, se diseñó un mortero convencional aligerado con áridos de arcilla expandida en diferentes porcentajes y mezclas para, posteriormente, sustituir el árido natural por árido reciclado de hormigón (ARH) y mixto (ARM).

Previamente se caracterizaron los diferentes materiales utilizados en las mezclas, con el objetivo de conocer las referencias de partida, tanto para el estudio de las propiedades mecánicas de los morteros diseñados como de su comportamiento a la durabilidad frente a los agentes agresivos externos.

El proceso experimental utilizado en las investigaciones se desarrolló en tres fases diferenciadas:

- a) Fase preliminar: Se comenzaron las investigaciones fabricando morteros con áridos convencionales, denominados “morteros base” (MB), de los que se analizaron algunas de sus propiedades, tanto en estado fresco como en estado endurecido.
- b) Fase intermedia: Los morteros se aligeraron mediante diferentes técnicas, de acuerdo con lo referido en el Apartado 3.3, centrandos los trabajos en la adición de arcilla expandida.

Para la ejecución de estos morteros se siguieron las recomendaciones de los fabricantes en lo referido a la dosificación, porcentajes y tipos de arcilla expandida utilizadas.

También se consideraron las dosificaciones recogidas en la referencia bibliográfica de título "Morteros aligerados con arcilla expandida: Influencia de la granulometría y la adición de fibras de vidrio AR en el comportamiento mecánico" (Río Merino, Santa Cruz Astorqui et al. 2.005)³⁷³.

Con estos datos de partida se fabricaron morteros con la menor densidad posible, variando la cantidad y el tipo de arcilla expandida utilizada. Los morteros ligeros obtenidos se denominaron "*morteros de referencia*" (MR).

De estos morteros se analizaron las mismas propiedades que los "*morteros base*" (MB), para conocer su comportamiento al incluir la arcilla expandida en las mezclas. De todas las amasadas realizadas se seleccionó una que cumplía con unos requisitos de resistencias mecánicas y ligereza establecidos previamente.

- c) Fase de diseño: Una vez obtenidos el mortero de referencia seleccionado, se procedió a sustituir todo el árido natural de esta mezcla por áridos reciclados procedentes de escombros de hormigón (ARH) y mixtos (ARM). A estos morteros les denominamos "*morteros de diseño*".

Se realizaron ensayos para comparar las propiedades de los "*morteros base*", de los "*morteros ligeros de referencia*" realizados con áridos naturales, y de los "*morteros de diseño*" realizados con áridos reciclados, con el fin de evaluar las variaciones que presentaban los "*morteros de diseño*" respecto a los "*morteros base*" y de los "*morteros de referencia*".

³⁷³ Río Merino, M. d., J. Santa Cruz Astorqui, et al. (2.005). "Morteros aligerados con arcilla expandida: Influencia de la granulometría en la adición de fibras de vidrio AR en el comportamiento mecánico".

5.2. DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES

Las investigaciones que fundamentan esta Tesis Doctoral desarrollan un conjunto de estudios experimentales, para determinar las características de los materiales utilizados en la fabricación de los morteros diseñados y conocer cómo éstas influyen en sus propiedades y comportamiento. De igual forma, se hace un estudio del comportamiento mecánico de los morteros y de su durabilidad en situaciones críticas de prestación.

Las variables de diseño consideradas son: la naturaleza del árido empleado, el tipo de cemento, el porcentaje de sustitución del árido natural por arcilla expandida, y el tipo de arcilla expandida empleado.

El árido influye de forma directa en las propiedades mecánicas y de durabilidad de los morteros. En esta Tesis se utilizan tres tipos de áridos:

- Arena lavada (AN), material granular que ha servido de referencia para comparar los resultados obtenidos en la caracterización de los áridos reciclados, de acuerdo con lo referido en el capítulo anterior.
- Árido reciclado de hormigón (ARH) procedente de la fragmentación de piezas prefabricadas y restos de material del proceso de hormigonado.
- Árido reciclado mixto (ARM), obtenido en una Planta de Tratamiento de áridos de demolición y deconstrucción, compuesto por agregados pétreos.

El cemento empleado es un CEM I 42,5R, con altas resistencias iniciales y recomendado para la fabricación de morteros y hormigones. Permite elaborar morteros con una menor cantidad de agua, manteniendo la plasticidad de las mezclas y reduciendo las retracciones.

El porcentaje de sustitución del árido natural (AN) por arcilla expandida, así como los tipos de arcilla expandida a emplear, se consideran factores determinantes en las propiedades de los morteros elaborados. Se han seguido las recomendaciones dadas por el fabricante y por referencias

obtenidas en estudios precedentes (Río Merino, Santa Cruz Astorqui et al. 2.005)³⁷⁴.

5.3. DOSIFICACIONES EXPERIMENTALES

Las dosificaciones de los morteros se han diseñado de acuerdo con las prescripciones establecidas en los manuales, y según las recomendaciones de la relación de componentes en peso (cemento/arena) recogidas en la práctica habitual.

Para las dosificaciones experimentales de esta Tesis Doctoral se ha optado por una dosificación 1/4, por ser esta válida para cualquier uso, y estar en un punto intermedio entre lo que se denominan morteros ricos (relaciones cemento/arena 1/1, 1/2 y 1/3) y los morteros pobres (1/6, 1/8, 1/10).

MORTEROS DE CEMENTO						
Usos	Relación de cemento / árido en peso					
Albañilería			1/3	1/4	1/6	1/7
Mampostería				1/4	1/6	1/7
Revestimiento	1/1	1/2	1/3	1/4	1/6	1/8

Tabla 5.1: Relaciones en peso de los morteros utilizados en construcción.

Se han propuesto 14 niveles de sustitución del árido natural por arcilla expandida y áridos reciclados:

- Un porcentaje nulo de sustitución del árido natural, que se corresponde con el “mortero base” (MB).
- Doce niveles de sustitución de árido natural (AN) por diferentes combinaciones y porcentajes de arcilla expandida, donde se selecciona la mezcla del mortero que presenta una mejor combinación de prestaciones mecánicas y menor densidad.

³⁷⁴ Río Merino, M. d., J. Santa Cruz Astorqui and M. González Cortina (2.005). "Morteros aligerados con arcilla expandida: Influencia de la granulometría en la adición de fibras de vidrio AR en el comportamiento mecánico".

- Un nivel de sustitución, donde todo el árido natural (AN) que posee el “mortero de referencia” (MR) seleccionado en el apartado anterior, es sustituido por áridos reciclados de hormigón (ARH) y mixtos (ARM), dosificándose “morteros de diseño” con cada tipo de árido reciclado.

DISTRIBUCIÓN DEL ÁRIDO							
		Arena	Arcilla exp. 2-4	Arcilla exp. 3-8	ARH	ARM	
Mortero Base	MB	100%	-	-	-	-	
Mortero de Referencia	TIPO A	MRA1	75%	-	25%	-	-
		MRA2	50%	-	50%	-	-
		MRA3	25%	-	75%	-	-
	TIPO B	MRB1	75%	25%	-	-	-
		MRB2	50%	50%	-	-	-
		MRB3	25%	75%	-	-	-
	TIPO C 50% sustitución	MRC1	50%	50%	50%	-	-
		MRC2	50%	25%	75%	-	-
		MRC3	50%	75%	25%	-	-
	TIPO D 75% sustitución	MRD1	25%	50%	50%	-	-
		MRD2	25%	25%	75%	-	-
		MRD3	25%	75%	25%	-	-
Mortero de diseño	MLH	-	25%	75%	25%	-	
	MLM	-	25%	75%	-	25%	

Tabla 5.2: Distribución del árido en los morteros estudiados.

5.4. PROCEDIMIENTO OPERATORIO

El proceso de preparación de los morteros, la preparación de las probetas y el estudio de las características mecánicas y de durabilidad se realiza de forma sistematizada en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos.

A continuación, se describen los procedimientos de análisis utilizados y el desarrollo de los trabajos necesarios para la preparación de las probetas utilizadas en los diferentes ensayos.



Figura 5.1: Laboratorio de Materiales de Construcción de la EPS de la UBU.

5.4.1. Preparación de los materiales

Para la elaboración de cada una de las dosificaciones realizadas se estableció un procedimiento único para la fabricación de cada una de las amasadas ejecutadas, siguiendo los pasos que se comentan a continuación.

Los materiales se mantienen en el laboratorio un mínimo de 24 horas antes de la fabricación de los diferentes morteros, a una temperatura entre 20-25°C. Se pesan por separado cada uno de los componentes: arena lavada (AN), arcilla expandida 2-4 mm, arcilla expandida 3-8F, áridos reciclados de hormigón (ARH), árido reciclado mixto (ARM), el cemento y el agua, empleando una balanza con un error máximo del $\pm 0,5\%$.

Una vez pesados los materiales, se introducen en una bolsa de plástico donde, mediante doce volteos, se mezclan de forma homogénea.

Posteriormente, se humedece el recipiente de la amasadora automática y se introduce la mezcla homogénea de los componentes sólidos, se añade la totalidad del agua necesaria para cada dosificación y se posiciona el recipiente en el bastidor de la amasadora para comenzar la mezcla automática.

5.4.2. Dosificación de los componentes

Para determinar las proporciones de los componentes se han tomado como referencia las recomendaciones tradicionales, que en la mayoría de la bibliografía clásica consultada establece unas proporciones entre el cemento y la arena en función del uso y de las exigencias mecánicas.

El Pliego de Condiciones Técnicas de la Dirección General de Arquitectura, define a título orientativo las dosificaciones usuales en función del uso del mortero (Tabla 5.3).

DOSIFICACIONES SEGÚN PLIEGO CONDICIONES TÉCNICAS				
Uso	Relación C/A	Cemento (Kg)	Arena (m ³)	Agua (m ³)
Albañilería	1/3	440	0,975	0,260
	1/4	350	1,030	0,260
	1/6	250	1,100	0,255
	1/7	217	1,130	0,255
Mampostería	1/4	350	1,030	0,260
	1/6	250	1,100	0,255
	1/7	215	1,130	0,255
Revestimientos	1/1	920	0,680	0,270
	1/2	600	0,880	0,265
	1/3	440	0,975	0,260
	1/4	350	1,030	0,260
	1/6	250	1,100	0,255
	1/8	190	1,130	0,255
Soleras	1/6	250	1,100	0,255
	1/8	190	1,130	0,255
	1/10	160	1,150	0,250

Tabla 5.3: Dosificación de los morteros según Pliego Condiciones de la Dirección General de Arquitectura.

La Normas Tecnológicas de la Edificación (NTE), de aplicación común en las obras de edificación, especifican los distintos tipos de mortero en relación con la cantidad de los componentes que los forman. Las relaciones para los morteros de albañilería se recogen en la Tabla 5.4.

La Norma Básica NBE-FL 90 (Urbanismo 1990)³⁷⁵, de obligado cumplimiento hasta la entrada en vigor del CTE, recomienda la relación entre

³⁷⁵ Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (1979). NBE-FL-90. "Fachadas de Fábrica de Ladrillo". B. n. 93.

componentes asociándolo a las resistencia. Así, para una relación cemento/arena (1/4), establece una resistencia a compresión de 8 Kp/cm² y un tipo de mortero denominado M-80.

DOSIFICACIONES SEGÚN NORMAS TECNOLÓGICAS				
Uso	Relación C/A	Cemento (Kg)	Arena (m ³)	Agua (m ³)
Enfoscados	1/3	440	0,975	0,260
	1/4	350	1,030	0,260
	1/6	250	1,100	0,255
Revocos	1/1	920	0,950	0,270
	1/2	600	1,300	0,265
Tabiques de ladrillo	1/6	-	-	-
Fachadas de ladrillo	1/6	-	-	-

Tabla 5.4 : Dosificación de los morteros según NTE.

El Código Técnico de Edificación CTE, en su Apartado 4.6.2, sigue con el mismo razonamiento y asocia la resistencia a compresión de las fábricas de ladrillo y bloque de hormigón con la indicación de la resistencia mínima del mortero de juntas, sin exigir proporciones para la composición del mortero ni la cantidad mínima de cemento. En esta misma línea, la Asociación de Fabricantes de Mortero (AFAM) designa a los morteros en función a su resistencia a compresión, absorción de agua y conductividad térmica.

Tanto en las Plantas de Preparación de Morteros como en los Laboratorios de Ensayo, las dosificaciones se realizan en peso de los componentes. Por el contrario, los morteros elaborados en obra, en la práctica habitual, se dosifican en volumen, por ser más sencillo cubicar los componentes mediante recipientes de capacidad conocida. La transformación de la dosificación de volumen a peso se ha realizado utilizando la densidad aparente de cada material.

La proporción agua/cemento, que va a determinar la trabajabilidad del mortero y que va a influir en las prestaciones finales del mismo, se ha fijado para conseguir una consistencia plástica, ensayada de acuerdo a la Norma

UNE-EN 1015-3 (AENOR 2000)³⁷⁶, dicha proporción debe ser tal que el valor del escurrimiento esté dentro de los límites fijados por la Norma UNE-EN 1015-2 (AENOR 2007)³⁷⁷ en función de la densidad aparente del mortero fresco.

VALOR DEL ESCURRIMIENTO S/ UNE-EN 1015-2	
Densidad aparente (Kg/m ³)	Valor de escurrimiento (mm)
> 1200	175 ± 10
> 600 a ≤ 1200	160 ± 10
> 600 a ≤ 1200	140 ± 10
< 300	120 ± 10

Tabla 5.5: Valor del escurrimiento en función a la densidad aparente del mortero fresco.

5.4.3. Amasado

El proceso de amasado tiene por finalidad recubrir los áridos con una capa de pasta de cemento, y mezclar todos los componentes para conseguir una masa uniforme. Para realizar la mezcla del cemento, el árido natural, agua y, en su caso, los tipos de arcillas expandidas y los áridos reciclados de las diferentes dosificaciones, se emplea una amasadora mecánica Marca Proeti Modelo C0087 (Figura 5.2 derecha).



Figura 5.2: Amasadora mecánica (derecha). Preparación de los materiales (izquierda).

³⁷⁶ AENOR (2000). "UNE-EN 1015-3. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Determinación de la consistencia del mortero fresco".

³⁷⁷ AENOR (2007). "UNE-EN 1015-2 . Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Toma de muestra total de morteros y preparación de los morteros para ensayo"

El equipo de amasado dispone de un programa con el tiempo de amasado (90 segundos) y la frecuencia, de acuerdo con los parámetros establecidos en la Norma UNE-EN 1015-2. (AENOR 2007)³⁷⁸.

5.4.4. Preparación de las probetas

Para la realización de los ensayos de resistencias mecánicas se fabricaron probetas prismáticas de dimensiones (40x40x160) mm³, de acuerdo a la Norma UNE-EN 1015-2 (AENOR 2007)³⁷⁸.

Al finalizar la mezcla de los componentes en la amasadora automática, y luego de realizar el ensayo de consistencia, se procede al moldeo de las probetas prismáticas, depositando el mortero en el molde en dos tongadas, una inicial hasta la mitad del molde aproximadamente, realizando el compactado mediante pisón metálico, aplicando 25 golpes repartidos uniformemente, y una segunda vertiendo mortero por encima del molde, compactando con el pistón nuevamente. El exceso de mortero se retira con la regla de enrasar, con el fin de obtener una superficie de mortero plana y nivelada con el borde superior del molde.

Posteriormente, los moldes con el mortero se colocaron en cámara húmeda durante 24 horas. Transcurrido este tiempo, las probetas, una vez fraguado y endurecido el mortero, se desmoldan y se dejan en reposo durante 28 días, contados a partir del día de su fabricación.

Las piezas del molde se limpian y lubrican con aceite mineral, para evitar que el mortero se adhiera a dichas caras y facilitar el desmoldado.

Los moldes con el mortero se colocaron en cámara húmeda durante 24 horas, para luego proceder a desmoldar, y dejarlas durante 28 días contados desde el día de su fabricación.

³⁷⁸ AENOR (2007). "UNE-EN 1015-2 . Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Toma de muestra total de morteros y preparación de los morteros para ensayo".

En algunos de los ensayos realizados se han utilizado probetas metálicas de dimensiones $(100 \times 100 \times 100)$ mm³, y de dimensiones $(100 \times 100 \times 275)$ mm³, por las características de las mezclas dosificadas y el tamaño de la arcilla expandida utilizada.



Figura 5.3: Molde de $(40 \times 40 \times 160)$ mm³ (izquierda), molde $(100 \times 100 \times 275)$ mm³ (centro), y molde $(100 \times 100 \times 100)$ mm³ (derecha).

5.5. SELECCIÓN DOSIFICACIÓN DE ALIGERAMIENTO

Para seleccionar el aligeramiento del mortero base (MB), se han dosificado diferentes amasadas con distintas proporciones de sustitución de arena (AN) por el agregado ligero de arcilla expandida.

Para la selección del mortero de referencia (MR) se establece un programa de trabajo para conseguir dosificaciones idóneas siguiendo las siguientes premisas:

- Dosificar morteros sustituyendo la arena por uno o dos tipos de arcillas expandidas, añadiendo el cemento y el agua necesaria para alcanzar consistencias de 175 ± 10 mm.
- Conseguir que las dosificaciones alcancen una resistencia mínima a compresión a 28 días de 18 MPa.
- Las mezclas deberán tener una densidad máxima de 1600 Kg/m³.

Con los datos obtenidos se selecciona una dosificación que cumpla las premisas anteriores, que servirá de referencia para evaluar la variación de prestaciones entre el mortero patrón y el mortero de diseño.

De cada dosificación prepararemos tres amasadas de tres probetas cada una, de las que se han tomado las siguientes referencias:

1. Relación de sus componentes en peso, haciendo especial mención sobre la relación agua/cemento, de acuerdo con el objetivo de conseguir una consistencia 175 ± 10 mm.
2. Densidad del mortero fresco.
3. Consistencia del mortero en la mesa de sacudidas.
4. Resistencias mecánicas a compresión y flexión a los 28 días.

Para seleccionar la dosificación idónea del mortero de referencia (MR), se han establecido como criterios de elección la densidad del material y su resistencia mecánica. Es evidente que son muchos los factores que influyen en la durabilidad de un mortero, pero también no es menos cierto que un indicio de la durabilidad de un mortero es su resistencia mecánica.

Se han realizado cincuenta y una amasadas, con cuatro tipos de proporciones de sustitución y tipo de arcilla expandida (ver Tabla 5.2), de las cuales solo han cumplido las premisas de consistencia establecidas treinta y ocho, siendo el resto pruebas de dosificación para conseguir la relación agua/cemento idónea, que produzca el escurrimiento determinado en las premisas de diseño.



Figura 3.17: Diferentes mezclas de componentes en el diseño del mortero aligerado.

Los resultados de las dosificaciones realizadas se recogen en las Tablas 5.6, 5.7, 5.8 y 5.09.

DOSIFICACIONES MORTERO REFERENCIA TIPO A							
Tipo	Sustitución	Denominación	Cemento (gr)	Arena (gr)	3-8F (gr)	Agua (gr)	Valido
A1	25%	MRA1.1	450	1350	112,52	311,84	No
		MRA1.2			112,52	295,04	No
		MRA1.3			112,52	286,32	No
		MRA1.4			112,52	276,10	Si
		MRA1.5			112,52	276,10	Si
		MRA1.6			112,52	275,54	Si
A2	50%	MRA2.1	475	950	237,60	260,35	No
		MRA2.2			237,60	274,74	Si
		MRA2.3			237,60	275,82	Si
		MRA2.4			237,60	276,62	Si
		MRA2.5			237,60	277,09	Si
A3	75%	MRA3.1	500	500	375,00	314,05	No
		MRA3.2			375,00	336,09	No
		MRA3.3			375,00	319,03	Si
		MRA3.4			375,00	311,00	Si
		MRA3.5			375,00	305,32	Si

Tabla 5.6: Dosificaciones morteros referencia Tipo A.

DOSIFICACIONES MORTERO REFERENCIA TIPO B							
Tipo	Sustitución	Denomina.	Cemento (gr)	Arena (gr)	2-4 (gr)	Agua (gr)	Valido
B1	25%	MRB1.1	450	1350	122,90	303,74	No
		MRB1.2			122,90	282,82	Si
		MRB1.3			122,90	279,65	Si
		MRB1.4			122,90	279,18	Si
B2	50%	MRB2.1	475	950	295,41	282,06	No
		MRB2.2			295,40	279,76	Si
		MRB2.3			259,40	282,32	Si
		MRB2.4			259,40	284,05	Si
B3	75%	MRB3.1	500	500	375,10	284,05	No
		MRB3.2			375,10	310,50	Si
		MRB3.3			375,10	311,90	Si
		MRB3.4			375,10	311,56	Si

Tabla 5.7: Dosificaciones morteros referencia Tipo B.

DOSIFICACIONES MORTERO REFERENCIA TIPO C								
Tipo	Sustitución	Denomina.	Cem. (gr)	Arena (gr)	2-4 (gr)	3-8F (gr)	Agua (gr)	Valido
C1	50% 50% tipo 2-4 50% tipo 3-8	MRC1.1	475	950	130,00	118,60	277,83	Si
		MRC1.2			130,00	118,60	275,10	Si
		MRC1.3			130,00	118,60	276,32	Si
C2	50% 25% tipo 2-4 75% tipo 3-8	MRC2.1	500	1000	68,40	187,60	301,30	Si
		MRC2.2			68,30	187,70	297,15	Si
		MRC2.3			68,30	187,70	296,07	Si
C3	50% 75% tipo 2-4 25% tipo 3-8	MRC3.1	500	1000	204,90	62,80	284,05	No
		MRC3.2			204,70	62,70	292,60	Si
		MRC3.3			204,90	62,40	292,18	Si
		MRC3.4			204,90	62,50	290,71	Si

Tabla 5.8: Dosificaciones morteros referencia Tipo C.

DOSIFICACIONES MORTERO REFERENCIA TIPO D								
Tipo	Sustitución	Denomina.	Cem. (gr)	Arena (gr)	2-4 (gr)	3-8F (gr)	Agua (gr)	Valido
D1	75% 50% tipo 2-4 50% tipo 3-8	MRD1.1	500	500	207,70	187,40	308,56	No
		MRD1.2			204,90	187,30	317,65	No
		MRD1.3			204,70	187,60	314,54	Si
		MRD1.4			204,80	187,60	314,05	Si
		MRD1.5			204,80	187,50	315,87	Si
D2	75% 25% tipo 2-4 75% tipo 3-8	MRD2.1	500	500	307,20	93,70	305,55	No
		MRD2.2			307,30	93,80	301,81	Si
		MRD2.3			307,30	93,70	307,60	No
		MRD2.4			307,30	93,60	305,18	Si
		MRD2.5			307,30	93,60	305,69	Si
D3	75% 75% tipo 2-4 25% tipo 3-8	MRD3.1	500	500	102,40	281,30	310,23	Si
		MRD3.2			102,40	282,40	310,09	Si
		MRD3.4			102,40	282,40	310,25	Si

Tabla 5.9: Dosificaciones morteros de referencia Tipo D.

Los resultados de las propiedades físicas y mecánicas de las dosificaciones válidas se recogen en las Tablas 5.10, 5.11, 5.12 y 5.13.

PROPIEDADES MORTERO REFERENCIA TIPO A						
Tipo	Denominación	a/c	Consist. (mm)	Densidad (kg/m ³)	R.compr. (MPa)	R.tracc. (MPa)
A1	MRA1.1	0,6930*	225,0*			
	MRA1.2	0,6556*	198,5*			
	MRA1.3	0,6363*	185,0*			
	MRA1.4	0,6136	176,50	1.955,80	30,38	5,75
	MRA1.5	0,6136	178,00	1.959,90	29,29	5,44
	MRA1.6	0,6123	171,50	1.952,10	29,85	5,19
A2	MRA2.1	0,5481*	140,5*			
	MRA2.2	0,5784	173,0	1.709,40	22,98	5,10
	MRA2.3	0,5807	166,0	1.731,00	24,01	5,26
	MRA2.4	0,5824	165,0	1.719,20	24,01	5,26
	MRA2.5	0,5833	167,0	1.737,50	25,46	5,37
A3	MRA3.1	0,6281*	157,5*			
	MRA3.2	0,6722*	210,0*			
	MRA3.3	0,6381	185,00	1.445,40	19,76	3,99
	MRA3.4	0,6220	182,75	1.410,40	18,65	4,07
	MRA3.5	0,6106	175,75	1.431,80	19,15	4,41

* Amasada no válida

Tabla 5.10: Propiedades físicas y mecánica mortero referencia Tipo A.

PROPIEDADES MORTERO REFERENCIA TIPO B						
Tipo	Denominación	a/c	Consist. (mm)	Densidad (Kg/m ³)	R.compr. (MPa)	R.tracc. (MPa)
B1	MRB1.1	0,6750*				
	MRB1.2	0,6285	183,00	1.930,60	33,67	6,84
	MRB1.3	0,6214	178,50	1.977,40	36,52	5,34
	MRB1.4	0,6204	183,50	1.966,50	35,97	5,35
B2	MRB2.1	0,5938*				
	MRB2.2	0,5890	167,00	1.742,20	27,41	5,41
	MRB2.3	0,5944	166,50	1.750,60	33,54	5,12
	MRB2.4	0,5980	183,50	1.730,40	-	-
B3	MRB3.1	0,5681*				
	MRB3.2	0,6210	184,00	1.481,30	20,28	5,33
	MRB3.3	0,6238	170,50	1.488,30	22,23	5,44
	MRB3.4	0,6231	171,25	1.461,30	21,58	4,63

* Amasada no válida

Tabla 5.11: Propiedades físicas y mecánica mortero referencia Tipo B.

PROPIEDADES MORTERO REFERENCIA TIPO C						
Tipo	Denominación	a/c	Consist. (mm)	Densidad (Kg/m ³)	R.compr. (MPa)	R.tracc. (MPa)
C1	MRC1.1	0,5849	180,50	1.710,50	29,46	3,85
	MRC1.2	0,5792	174,25	1.699,70	28,57	3,77
	MRC1.3	0,5817	175,00	1.700,10	28,10	4,15
C2	MRC2.1	0,6026	179,50	1.711,90	26,79	6,02
	MRC2.2	0,5943	180,50	1.721,50	29,39	5,42
	MRC2.3	0,5921	183,50	1.695,70	23,24	4,93
C3	MRC3.1	0,5681*				
	MRC3.2	0,5852	184,50	1.735,40	28,04	5,30
	MRC3.3	0,5844	176,50	1.730,80	26,65	4,49
	MRC3.4	0,5814	170,25	1.709,50	27,69	4,34

* Amasada no válida

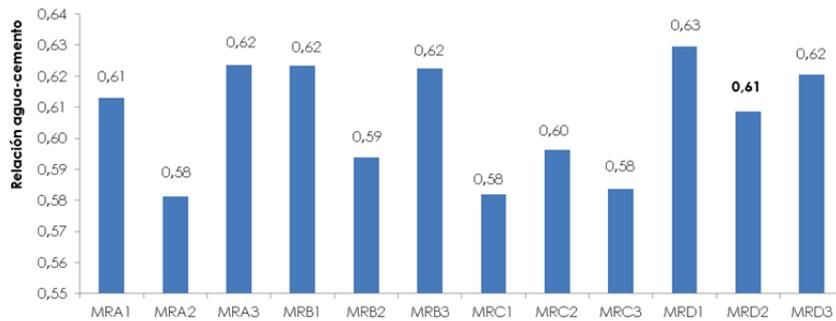
Tabla 5.12: Propiedades físicas y mecánica mortero referencia Tipo C.

PROPIEDADES MORTERO REFERENCIA TIPO D						
Tipo	Denominación	a/c	Consist. (mm)	Densidad (Kg/m ³)	R.compr. (MPa)	R.tracc. (MPa)
D1	MRD1.1	0,6171*				
	MRD1.2	0,6353*				
	MRD1.3	0,6291	171,50	1.418,60	20,30	3,93
	MRD1.4	0,6281	165,00	1.425,00	19,60	3,57
	MRD1.5	0,6317	172,00	1.524,40	16,37	3,29
D2	MRD2.1	0,6111*				
	MRD2.2	0,6036	167,00	1.414,00	19,40	3,30
	MRD2.3	0,6152*	169,0*			
	MRD2.4	0,6104	178,00	1.427,40	19,68	3,17
	MRD2.5	0,6114	179,25	1.433,40	18,69	3,35
D3	MRD3.1	0,6205	174,50	1.425,10	16,04	2,88
	MRD3.2	0,6202	168,00	1.428,70	18,71	3,44
	MRD3.3	0,6205	184,50	1.416,50	18,48	3,15

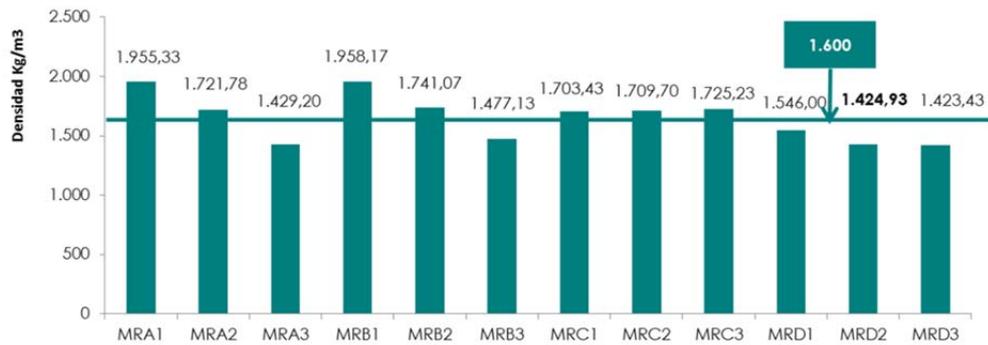
* Amasada no válida

Tabla 5.13: Propiedades físicas y mecánica mortero referencia Tipo D.

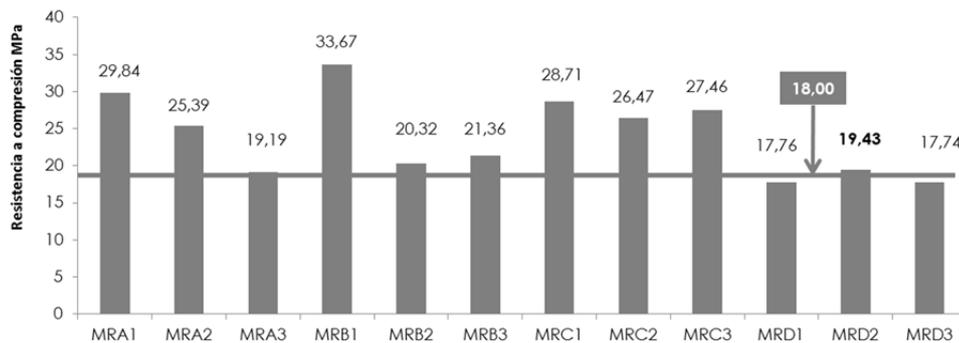
Para facilitar el proceso comparativo ente tipos de morteros, se han realizado las medias aritméticas de todas las probetas realizadas y se han representado sus valores en las Gráficas 5.1, 5.2 y 5.3.



Gráfica 5.1: Relación agua-cemento de los morteros de referencia.



Gráfica 5.2: Densidad de los morteros de referencia.



Gráfica 5.3: Resistencia a compresión de los morteros de referencia.

De los ensayos realizados en el laboratorio con los morteros diseñados, se pueden considerar las siguientes conclusiones:

- Se han diseñado diez dosificaciones para el mortero de referencia (MR) que cumplen con las expectativas de resistencia fijada en las premisas de aligeramiento.
- Solo cinco dosificaciones cumplen las premisas de poseer una densidad inferior a 1600 Kg/m³.
- Únicamente las dosificaciones correspondientes a los morteros de referencia tipo MRA3, MRB3 y MRD2 cumplen con las dos premisas anteriores.

Dado que se está buscando un material lo más liviano posible, se selecciona el mortero tipo MRD2, como mortero de referencia (MR), ya que tiene la densidad aparente más baja y la menor relación agua-cemento.

5.6. ESTUDIO DE LAS DOSIFICACIONES

5.6.1. Dosificaciones

Se han fabricado cuatro tipos de morteros con una relación cemento-árido en peso de (1:4). Los morteros se designan de acuerdo con las siguientes referencias:

- Mortero Base: Designado con las letras MB, seguidas de un número que identifica la masada de la que procede. Este mortero base (MB) está compuesto únicamente por cemento y arena natural lavada (AN).
- Mortero de Referencia: Se identifica como MR, seguido de un número que indica el número de amasada de la que procede. Como se indicó en el Apartado 5.5, este mortero está compuesto por un 75% de sustitución de arena lavada (AN) por arcilla expandida y, dentro de este 75%, por un 25% del tipo de arcilla expandida 2-4 mm. y un 75% del tipo 3-8 mm.
- Mortero de Diseño: Este mortero tiene la misma dosificación que el mortero de referencia (MR), pero sustituyendo en su totalidad el árido natural por árido reciclado, dando lugar a las denominaciones MLH,

cuando el árido reciclado es de hormigón (ARH) y a la denominación MLM, cuando el árido reciclado es mixto (ARM).

En las Tablas 5.14 y 5.15, se recogen las cantidades de cada componente en peso:

DOSIFICACIONES DE LOS MORTEROS MB y MR (gr)							
Tipo	Denomina.	Cemento	Arena	2-4	3-8F	Agua	W/C
MB	MB-1	450	1800	-	-	295,33	0,656
	MB-2	450	1800	-	-	296,29	0,658
	MB-3	450	1800	-	-	296,8	0,659
	MB-4	450	1800	-	-	296,29	0,658
	MB-5	450	1800	-	-	296,73	0,659
	MB-6	900	3600	-	-	596,44	0,663
	MB-7	850	3400	-	-	559,76	0,658
	MB-8	800	3200	-	-	527,61	0,659
	MB-9	800	3200	-	-	527,61	0,659
	MB-10	800	3200	-	-	527,32	0,659
MR	MR-1	500	500	307,30	93,80	301,81	0,604
	MR-2	500	500	307,30	93,70	307,60	0,615
	MR-3	500	500	307,30	93,60	305,28	0,611
	MR-4	500	500	307,30	93,60	305,69	0,611
	MR-5	500	500	307,30	93,70	305,94	0,612
	MR-6	500	500	307,20	93,60	306,62	0,613
	MR-7	500	500	307,30	93,50	307,68	0,615
	MR-8	500	500	307,30	93,70	310,30	0,621
	MR-9	500	500	307,30	93,70	310,07	0,620
	MR-10	850	850	522,60	159,20	536,64	0,631

Tabla 5.14: Dosificaciones del mortero base y del mortero de referencia.

DOSIFICACIONES DE LOS MORTEROS MLM y MLH (gr)								
Tipo	Denom.	Cemento	ARH	ARM	2-4	3-8F	Agua	W/C
MLH	MLH-1	500	436,80	-	417,20	93,80	398,33	0,797
	MLH-2	500	436,70	-	417,20	93,70	380,74	0,762
	MLH-3	500	436,80	-	417,30	93,70	379,93	0,760
	MLH-4	500	436,80	-	417,20	93,70	375,83	0,752
	MLH-5	500	436,70	-	417,20	93,60	376,59	0,753
	MLH-6	500	436,60	-	417,20	93,70	375,40	0,751
	MLH-7	1000	873,20	-	834,40	187,40	750,46	0,751
	MLH-8	500	436,60	-	417,20	93,80	372,50	0,745
	MLH-9	2750	2402,00	-	2290,00	510,00	2035,00	0,740
	MLH-10	500	436,70	-	417,20	93,0	372,67	0,745
MLM	MLM-1	500	-	378,20	417,30	93,70	406,00	0,813
	MLM-2	500	-	378,30	417,40	93,70	405,58	0,811
	MLM-3	500	-	378,30	417,40	93,70	405,84	0,812
	MLM-4	500	-	378,30	417,50	93,70	406,17	0,812
	MLM-5	500	-	378,40	417,50	93,70	406,54	0,813
	MLM-6	2750	-	2081,20	2296,25	515,35	2237,43	0,814
	MLM-7	500	-	378,00	417,20	93,60	414,95	0,830
	MLM-8	500	-	378,00	417,20	93,70	416,22	0,832
	MLM-9	500	-	378,00	417,30	93,50	416,81	0,834
	MLM-10	1000	-	756,20	834,50	187,30	835,19	0,835

Tabla 5.15: Dosificaciones del mortero de diseño con árido reciclado hormigón y mortero de diseño con árido reciclado mixto.

El estudio de la dosificación de un mortero consiste en determinar la mezcla óptima de los distintos materiales para que el producto resultante sea lo más compacto y estable posible, con la cantidad idónea de cemento y agua, para obtener un material con las cualidades necesarias para los usos a los que se le va a destinar.

La relación de componentes adoptada en los cálculos ha sido en peso, por la facilidad de preparación de las cantidades necesarias de cada material en el laboratorio. Para evitar cualquier alteración en las dosificaciones se ha procedido a un secado a los áridos, tanto de la arena lavaba (AN) como los áridos reciclados (ARH) y (ARM), evitando así el efecto del esponjamiento producido por la humedad.

Antes de proceder a realizar las amasadas correspondientes a cada uno de los ensayos realizados se efectuaron dos dosificaciones de prueba, con el objetivo ajustar las cantidades necesarias de cada uno de los componentes. Una vez ajustadas, se prepararon diez amasadas de cada uno de los morteros analizados, con el fin de determinar sus propiedades, tanto en estado fresco como endurecido.

5.6.2. Granulometrías

Se han trazado las curvas granulométricas de los áridos de cada uno de los tipos de los morteros objeto de estudio. En la Tabla 5.16 y en la Gráfica 5.4 se recogen los resultados obtenidos para cada una de ellas.

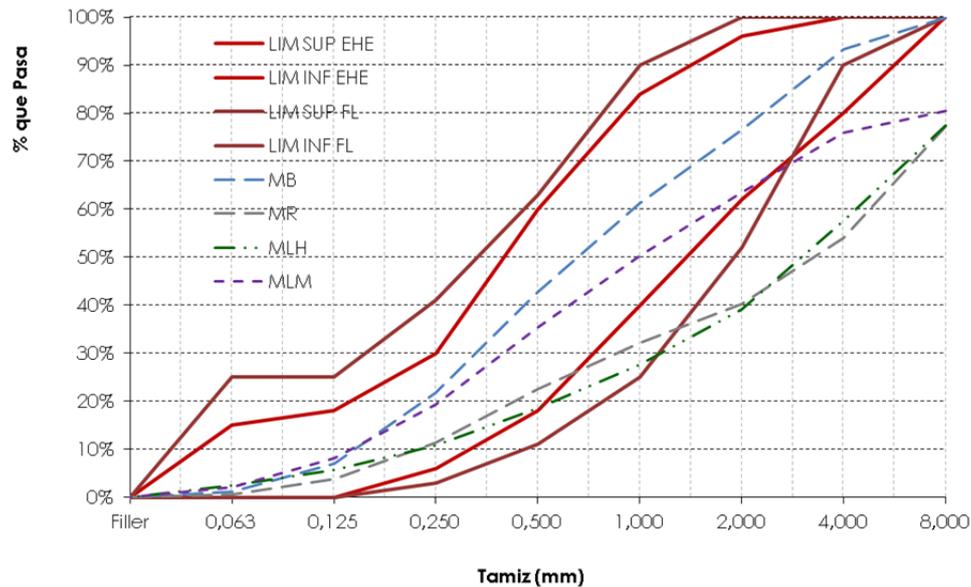
GRANULOMETRÍAS ÁRIDOS EN % PASA ACUMULADO				
Luz tamiz en mm	MB	MR	MLH	MLM
8	100	77,24	77,40	80,42
4	93,23	54,04	57,66	75,96
2	76,54	40,23	39,17	63,51
1	61,16	32,07	27,57	50,17
0,5	42,75	22,41	18,55	35,41
0,25	21,71	11,38	10,80	19,34
0,125	7,07	3,71	5,61	8,11
0,063	1,08	0,57	2,50	2,12
Filler	0	0	0	0

Tabla 5.16: Granulometrías de los morteros ensayados.

En los resultados de la Gráfica 5.4 se ve como, excepto en el caso de la mezcla del mortero base (MB), el resto de curvas se sitúan fuera de los límites establecidos tanto por la EHE-08 como por la Norma NBE-FL 90, siendo esta desviación superior en el mortero de referencia (MR) y en el mortero de diseño (MLH). Por el contrario, la curva granulométrica del mortero de diseño (MLM) está más encajada entre los límites.

Estas discontinuidades en la granulometría pueden ser determinantes en las propiedades finales de los morteros, ya que las distintas cantidades de los

diferentes tamaños deben cerrar los huecos dejados por los de mayor tamaño, y así sucesivamente hasta alcanzar la máxima compacidad.



Gráfica 5.4: Curvas granulométricas de las mezclas diseñadas

Ante esta situación se dan dos alternativas posibles: corregir las granulometrías seleccionando las cantidades adecuadas de cada tamaño para lograr eliminar las discontinuidades, o seguir con las granulometrías originales, asumiendo la incertidumbre de los morteros diseñados.

Se opta por esta segunda opción, debido a que se desea diseñar un mortero que sea económicamente competitivo y, dado el precio actual de los áridos naturales en España, el uso de los áridos reciclados no serían viable en el caso de tener que someterlos a un proceso previo de selección.

5.7. PROPIEDADES DEL MORTERO FRESCO

5.7.1. Consistencia

5.7.1.1. Método del ensayo

La consistencia es una medida de la fluidez y/o humedad del mortero fresco, otorgando una medida de la deformabilidad del mortero fresco cuando se le somete a un determinado esfuerzo.

La consistencia del mortero se determinó según el procedimiento descrito en la Norma UNE-EN 1015-3 (AENOR 2000)³⁷⁹ (por la mesa de sacudidas).

Antes del comienzo de cada ensayo se procede a limpiar el disco de la mesa de sacudidas, así como también la superficie interior y bordes del molde utilizado para conformar el mortero. Este molde se coloca en el centro del disco de la mesa de sacudidas y se vierte dentro el mortero en dos capas, compactando cada una con diez golpes con el pisón, para garantizar un llenado uniforme. Seguidamente, se elimina el exceso de mortero con la regla de enrasar, se limpia la superficie libre, teniendo cuidado de eliminar el agua que pueda quedar alrededor del borde inferior del molde. Luego se levanta de forma lenta y en proyección vertical y se le somete a quince sacudidas, con una frecuencia constante aproximada de una sacudida por segundo.

El valor del escurrimiento se determina midiendo el diámetro del mortero extendido en dos direcciones perpendiculares entre sí utilizando un calibre, tomando como referencia el valor medio de las dos medidas. En la figura 5.4 se pueden observar los detalles del ensayo.

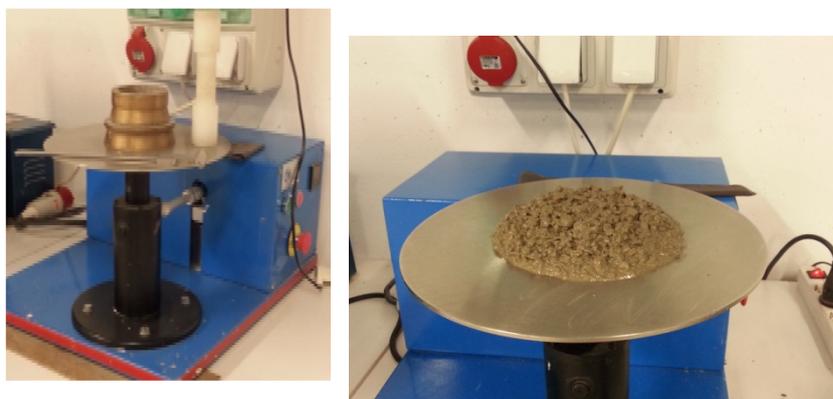


Figura 5.4: Mesa de sacudidas y elementos necesarios para la determinación de la consistencia.

³⁷⁹ AENOR (2000). "UNE-EN 1015-3. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Determinación de la consistencia del mortero fresco".

5.7.1.2. Resultados

Todos los morteros ejecutados, mortero base (MB), mortero de referencia (MR) y los morteros de diseño con diferentes tipos de árido reciclado (MLH y MLM), han sido dosificados con una relación de componentes en peso (1:4), siendo la cantidad de agua añadida en cada amasada la necesaria para conseguir una consistencia plástica, con un escurrimiento en la mesa de sacudidas de 175 ± 10 mm.

La Tabla 5.17, recoge la media aritmética de la cantidad de agua añadida a las diez amasadas dosificadas para cada uno de los tipos de mortero ensayados

RELACIÓN AGUA / CEMENTO				
Mortero	MB	MR	MLH	MLM
Relación w/c	0,659	0,615	0,756	0,821

Tabla 5.17: Relación agua/cemento de los morteros prescritos.

5.7.1.3. Conclusiones

Si analizamos los resultados obtenidos en el ensayo, se puede observar que el mortero de referencia (MR) demanda menos agua que el resto de los morteros dosificados, debido a la adición de la arcilla expandida, presentando una disminución del 6,70% respecto del mortero base (MB).

Los dos morteros dosificados con áridos reciclados (MLH y MLM) precisan mayor cantidad de agua para alcanzar la consistencia plástica, debido a la gran absorción de los áridos reciclados, circunstancia que ya se conocía por las referencias encontradas en el Estado del Arte, lo que determinará una disminución de las resistencias mecánicas. El mortero de diseño con árido reciclado de hormigón (MLH) presenta un incremento de agua de dosificación respecto el mortero referencia (MR) del 22,9% y de un 33,5% en el mortero de diseño fabricado con árido reciclado mixto (MLM).

Como conclusión, del estudio de los resultados de la consistencia de los morteros dosificados se puede afirmar que:

- La presencia de la arcilla expandida en el mortero de referencia (MR), disminuye la relación agua-cemento, pero este efecto beneficioso no compensa el incremento de la demanda de agua que se produce al sustituir el árido natural (AN) por los tipos de árido reciclado utilizados.
- La calidad del árido reciclado utilizado influye en la cantidad de agua que demandan las mezclas.
- Al determinar la consistencia de los morteros en la mesa de sacudidas se observa que los dosificados con arcilla expandida presentan unas tortadas no uniformes, por lo que, en algunos casos, se debe establecer la consistencia mediante cuatro determinaciones.

5.7.2. Aire ocluido

5.7.2.1. Método del ensayo

El contenido en aire ocluido permite conocer la cantidad de huecos existentes en las mezclas. Se ha determinado según la Norma UNE-EN 1015-7 (AENOR 1999)³⁸⁰ en la que se describe el método de la presión.

Para su realización se utiliza un equipo formado por un recipiente con tapa estanca con una capacidad para ensayar un litro de mortero. Además, cuenta con una cámara que se llena con aire mediante una pequeña bomba manual y que se equilibra a una presión conocida. Dispone también de un manómetro de lectura, una purga de aire, una válvula de purga de agua y un conducto por el que introducimos el agua que penetra en el interior de la cámara situada sobre el mortero.

Para realizar el ensayo, se llena el recipiente con el mortero en cuatro capas aproximadamente iguales, que se compactan mediante 10 golpes cortos de pisón regularmente repartidos para obtener una superficie plana. Finalmente, se elimina el exceso de mortero y se enrasa la superficie mediante una regla.

³⁸⁰ AENOR (1999). "UNE-EN 1015-7."Determinación del contenido en aire en el mortero fresco".

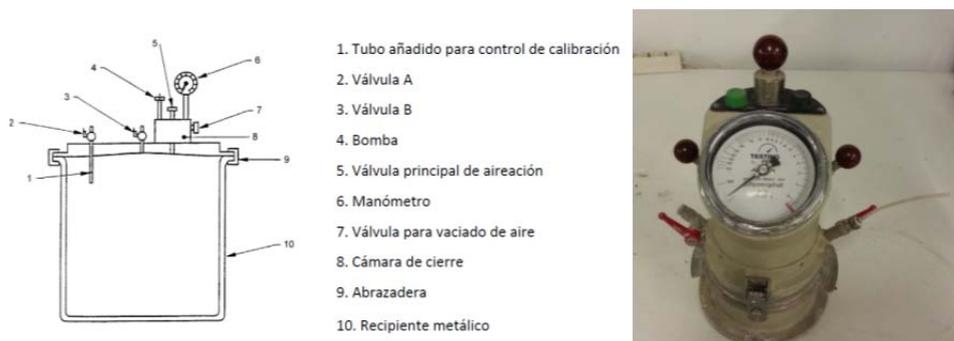


Figura 5.5: Equipo para realizar la determinación del aire ocluido.

El fundamento del ensayo está en equilibrar un volumen determinado de aire a presión, contenido en la cámara de aire del equipo, con el volumen desconocido de aire del mortero contenido en el recipiente con la muestra. La disminución de la presión en la cámara de aire es reflejo del aire contenido en la muestra de mortero ensayado. La valoración se hace en tanto por ciento de aire para la presión observada en la situación de equilibrio.

5.7.2.2. Resultados

Se han analizado diez amasadas de cada uno de los tipos de mortero objeto de estudio.

Dado que no se producía la estabilidad del aire a presión, se optó por tomar las lecturas a los 30 segundos. Esto se debe a que, por la forma y estructura de la arcilla expandida (ver Figura 3.8), ésta acumula aire ocluido entre sus poros, que luego aporta a las mezclas del mortero.

En la Tabla 5.18 se muestran las medias aritméticas de los resultados obtenidos para cada uno de los tipos de morteros ensayados:

AIRE OCLUIDO (%)				
Mortero	MB	MR	MLH	MLM
Aire ocluido	6,2	17,7*	22*	23*
* Mediciones realizadas a los 30 segundos				
Variación		185%	255%	271%

Tabla 5.18: Aire ocluido en %.

5.7.2.3. Conclusiones

Aunque tanto en los morteros de referencia (MR) como en los morteros de diseño no se logró la estabilización de las presiones, y debido a que el ensayo está diseñado para morteros con un contenido en aire inferior al 20%, se puede afirmar que el mayor contenido en aire facilita la trabajabilidad de las mezclas y que sus componentes deslicen los unos sobre los otros con facilidad, pero produciéndose en algunos la pérdida de cohesión entre ellos.

Para concluir, del estudio del aire ocluido de los morteros ensayados se pueden destacar las siguientes conclusiones:

- Todos los morteros que llevan en su composición arcilla expandida presentan incrementos muy significativos del aire ocluido, inferido por la propia porosidad y estructura interna de este tipo de árido.
- La sustitución de la arena natural (AN) por árido reciclado aumenta considerablemente el contenido en aire ocluido, probablemente por el aire que queda en el interior de los poros del mortero adherido.
- Se observa una clara influencia de la relación agua-cemento sobre el contenido en aire ocluido, resultando que los morteros con una baja relación (a/c) poseen menores contenidos de aire en su interior.
- Existe una relación entre el aire ocluido y a la densidad en estado fresco de los morteros, observándose que, a menor densidad, más aire ocluido contienen.

5.7.3. Densidad aparente del mortero fresco

5.7.3.1. Método del ensayo

El conocimiento de la densidad aparente de los morteros frescos es un referente para calcular la cantidad de agua que se combina con el cemento y para conocer la cantidad de agua de amasado que se evaporará durante el curado. Esta agua que se evapora deja espacios en el interior del mortero endurecido, disminuyendo tanto su densidad aparente como la resistencia mecánica a compresión.

La densidad aparente del mortero fresco se determina de acuerdo con el procedimiento establecido en la Norma UNE-EN 1015-6 (AENOR 1999)³⁸¹.

La norma establece un procedimiento operatorio en función del valor de escurrimiento de los morteros en la mesa de sacudidas. En las mezclas con consistencia plástica, como es el caso de los morteros diseñados en esta Tesis, se procede a llenar un recipiente metálico (Figura 5.6), con una capacidad de 1 litro.

El llenado se realiza en dos tongadas: la primera hasta la mitad y la segunda completando el volumen hasta rebosar. Cada una de las tongadas se compacta mediante basculación sobre una placa sólida y rígida del recipiente, volteando diez veces de un lado a otro, desde una altura aproximada de 30 mm.

La última tongada se enrasa y nivela con el borde superior hasta conseguir una superficie plana. Una vez lleno el molde se pesa, obteniendo el valor m_2 .



Figura 5.6 : Determinación de la densidad aparente del mortero fresco.

El valor de la densidad se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

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

³⁸¹ AENOR (1999). "UNE-EN 1015-6. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Determinación de la densidad aparente del mortero fresco".

Siendo:

m_1 es el peso del molde vacío.

m_2 es el peso del molde lleno de mortero.

V_v es el volumen del molde (1 litro según la norma).

5.7.3.2. Resultados

Los valores de la densidad aparente del mortero en fresco, están recogidos en las siguientes Tablas 5.19, 5.20, 5.21 y 5.22 y en la Gráfica 5.5.

DENSIDAD APARENTE MORTERO BASE					
Tipo	Denominación	Agua (gr)	W/C	Densidad (kg/m ³)	Media
MB	MB-1	295,33	0,656	2165	2179
	MB-2	296,29	0,658	2185	
	MB-3	296,78	0,660	2180	
	MB-4	296,29	0,658	2158	
	MB-5	296,73	0,659	2156	
	MB-6	526,95	0,659	2203	
	MB-7	596,44	0,663	2198	
	MB-8	559,76	0,659	2185	
	MB-9	527,61	0,660	2182	
	MB-10	527,32	0,659	2179	

Tabla 5.19: Densidad aparente del mortero base.

DENSIDAD APARENTE MORTERO REFERENCIA					
Tipo	Denominación	Agua (gr)	W/C	Densidad (kg/m ³)	Media
MR	MR-1	301,81	0,604	1414	1422
	MR-2	307,60	0,615	1405	
	MR-3	305,18	0,610	1427	
	MR-4	305,69	0,611	1433	
	MR-5	305,94	0,612	1417	
	MR-6	310,30	0,621	1433	
	MR-7	310,70	0,620	1404	
	MR-8	312,46	0,625	1446	
	MR-9	627,16	0,627	1443	
	MR-10	536,64	0,631	1397	

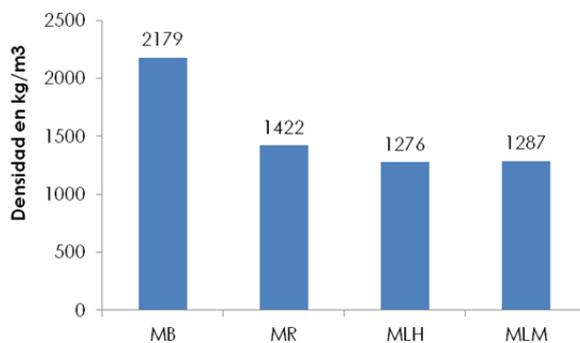
Tabla 5.20: Densidad aparente del mortero de referencia.

DENSIDAD APARENTE MORTERO DISEÑO - MLH					
Tipo	Denominación	Agua (gr)	W/C	Densidad (kg/m ³)	Media
MLH	MLH-1	398,33	0,797	1206	1276
	MLH-2	380,74	0,761	1210	
	MLH-3	379,93	0,760	1312	
	MLH-4	375,83	0,752	1282	
	MLH-5	375,40	0,751	1304	
	MLH-6	372,36	0,745	1264	
	MLH-7	372,67	0,745	1284	
	MLH-8	373,38	0,747	1308	
	MLH-9	373,64	0,747	1287	
	MLH-10	375,40	0,751	1304	

Tabla 5.21: Densidad aparente del mortero de diseño MLH.

DENSIDAD APARENTE MORTERO DISEÑO - MLM					
Tipo	Denominación	Agua (gr)	W/C	Densidad (kg/m ³)	Media
MLM	MLM-1	406,00	0,812	1269	1287
	MLM-2	405,58	0,811	1304	
	MLM-3	405,84	0,812	1278	
	MLM-4	406,17	0,812	1278	
	MLM-5	406,54	0,813	1293	
	MLM-6	407,34	0,815	1282	
	MLM-7	414,95	0,830	1297	
	MLM-8	415,01	0,830	1271	
	MLM-9	416,22	0,832	1287	
	MLM-10	416,81	0,834	1305	

Tabla 5.22: Densidad aparente del mortero de diseño MLM.



Gráfica 5.5: Densidades aparentes del mortero fresco.

5.7.3.3. Conclusiones

Como reflexión al ensayo realizado, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Los morteros que incorporan arcilla expandida presentan una menor densidad, circunstancia que ya se conoce de antemano por las características de este tipo de agregado.
- La densidad del mortero de diseño disminuye respecto a la del mortero de referencia (MR), debido a la inclusión del árido reciclado y a la menor densidad de éste, respecto al árido natural (AN). Esto se debe a que la densidad de los morteros depende principalmente de la densidad sus componentes, sobre todo la de los áridos empleados, ya que éstos constituyen la mayor parte del material.
- Aunque no de forma sustancial, la densidad del mortero de diseño con árido reciclado mixto (ARM) aumenta respecto al mortero de diseño con árido reciclado de hormigón (ARH), debido a la mayor densidad del primero.

5.8. PROPIEDADES DEL MORTERO ENDURECIDO

5.8.1. Densidad del mortero endurecido

Para determinar la densidad aparente seca del mortero endurecido se toma como referencia la Norma UNE-EN 1015-10 (AENOR 2007)³⁸².

El procedimiento del método utilizado para la determinación de la densidad es la relación existente entre la masa del mortero de una probeta normalizada y el volumen aparente que ocupa.

El volumen aparente de la probeta se determina en una balanza hidrostática por desplazamiento volumétrico, cuyo fundamento se encuentra en la aplicación del Teorema de Arquímedes.

³⁸² AENOR (2007). "UNE-EN 1015-10. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido".

La probeta se seca en la estufa a una temperatura de $(70\pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta peso constante. Después, se sumerge la probeta en agua a $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ hasta que no se observe aumento de masa (en dos pesadas sucesivas efectuadas en un intervalo de dos horas la diferencia entre ellas es menor de 0,2% en masa).

La probeta húmeda se pesa después de haber eliminado el exceso de agua mediante paño húmedo y se anota su masa ($m_{s,sat}$).

El volumen de la probeta se determina mediante pesada hidrostática: se sumerge un útil y se coloca la probeta alojada en el bastidor. En posición sumergida, y una vez que haya cesado la oscilación se pesa la masa de la probeta en esta posición ($m_{s,i}$).

El volumen de la probeta, se calcula por medio de la siguiente expresión:

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

Siendo:

$m_{s,sat}$ la masa de la probeta saturada del mortero endurecido.

$m_{s,i}$ la masa aparente de la probeta saturada del mortero endurecido sumergido en agua.

ρ_w la densidad del agua.

Los valores obtenidos en cada tipo de mortero se recogen en las Tablas 5.23, 5.24, 5.25, 5.26 y en la Gráfica 5.6.

DENSIDAD APARENTE MORTERO BASE - MB							
Tipo	Denominación	m_{seco} (gr)	$m_{s,sat}$ (gr)	$m_{s,l}$ (gr)	V_s (cm^3)	Densidad (Kg/m^3)	Media
MB	MB-1	526,00	559,03	306,53	252,50	2083	2160
	MB-2	540,57	540,57	317,73	222,83	2426	
	MB-3	547,47	581,57	325,27	256,30	2136	
	MB-4	548,90	585,23	326,43	258,80	2121	
	MB-5	539,37	574,77	321,20	253,57	2127	
	MB-6	536,97	573,40	318,90	254,50	2110	
	MB-7	545,33	582,63	325,13	257,50	2118	
	MB-8	541,30	573,13	318,77	254,37	2128	
	MB-9	569,27	577,20	320,93	256,27	2221	
	MB-10	543,53	575,17	320,27	254,90	2132	

Tabla 5.23: Densidad aparente del mortero base endurecido.

DENSIDAD APARENTE MORTERO DE REFERENCIA - MR							
Tipo	Denominación	m_{seco} (gr)	$m_{s,sat}$ (gr)	$m_{s,l}$ (gr)	V_s (cm^3)	Densidad (Kg/m^3)	Media
MR	MR-1	353,90	394,87	137,60	257,27	1382	1342
	MR-2	353,00	393,37	135,77	257,60	1379	
	MR-3	353,73	394,23	137,03	257,20	1382	
	MR-4	356,30	397,57	137,67	259,90	1392	
	MR-5	303,83	405,67	140,87	264,80	1187	
	MR-6	352,20	385,03	127,43	257,60	1376	
	MR-7	343,37	376,50	119,30	257,20	1341	
	MR-8	355,27	386,87	128,57	258,30	1388	
	MR-9	346,13	378,27	123,40	254,87	1352	

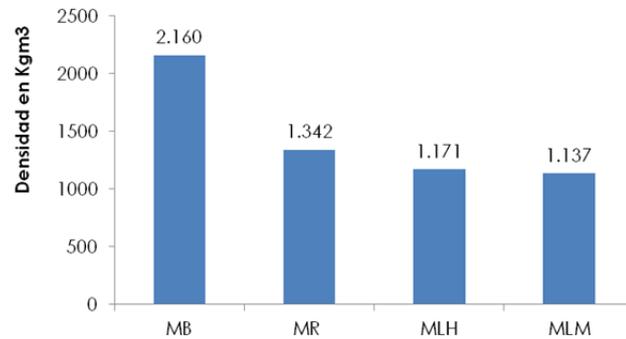
Tabla 5.24: Densidad aparente del mortero de referencia endurecido.

DENSIDAD APARENTE MORTERO DISEÑO - MLH							
Tipo	Denominación	m_{seco} (gr)	$m_{s,sat}$ (gr)	$m_{s,i}$ (gr)	V_s (cm^3)	Densidad (Kg/m^3)	Media
MLH	MLH-1	293,60	349,47	93,87	255,60	1149	1171
	MLH-2	305,13	352,20	96,20	256,00	1192	
	MLH-3	294,90	341,87	92,13	249,73	1181	
	MLH-4	306,00	347,13	94,97	252,17	1213	
	MLH-5	303,83	350,07	96,93	253,13	1200	
	MLH-6	306,83	357,03	100,30	256,73	1195	
	MLH-7	259,50	304,20	64,67	239,53	1083	
	MLH-8	304,13	346,47	92,00	254,47	1195	
	MLH-9	303,72	335,33	82,13	253,20	1200	
	MLH-10	284,03	358,10	99,97	258,13	1100	

Tabla 5.25 : Densidad aparente del mortero endurecido MLH.

DENSIDAD APARENTE MORTERO DE DISEÑO - MLM							
Tipo	Denominación	m_{seco} (gr)	$m_{s,sat}$ (gr)	$m_{s,i}$ (gr)	V_s (cm^3)	Densidad (Kg/m^3)	Media
MLM	MLM-1	291,60	340,47	88,90	251,57	1159	1137
	MLM-2	291,03	339,40	81,77	257,63	1130	
	MLM-3	292,90	344,53	86,70	257,83	1136	
	MLM-4	295,47	346,30	85,87	260,43	1135	
	MLM-5	303,83	346,57	88,17	258,40	1176	
	MLM-6	292,17	344,47	83,67	260,80	1120	
	MLM-7	296,13	347,35	88,33	259,02	1143	
	MLM-8	290,13	337,57	81,80	255,77	1134	
	MLM-9	285,83	342,97	85,20	257,77	1109	
	MLM-10	293,47	343,73	83,27	260,47	1127	

Tabla 5.26: Densidad aparente del mortero endurecido MLM.



Gráfica 5.6: Densidades aparentes de los morteros endurecidos.

5.8.1.1. Conclusiones

Con los resultados obtenidos, y comparando los valores de densidad aparente del mortero en fresco con los de la densidad aparente del mortero en estado endurecido de los distintos tipos de morteros ensayados, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Los morteros que incorporan arcilla expandida presentan una menor densidad a la de los morteros base. La inclusión de la arcilla expandida como agregado produce una disminución importante de la densidad aparente seca.
- Como sucedía con la densidad del mortero en estado fresco, los morteros de diseño presentan menores densidades que el mortero de referencia (MR). Sin embargo, el mortero de diseño con árido reciclado mixto (MLM) presenta una menor densidad del mortero de diseño con árido reciclado de hormigón (MLH), de forma distinta a lo que sucedía con la densidad del mortero en estado fresco.
- La disminución entre la densidad del mortero fresco y endurecido para el mortero base (MB) es de un 0,87% y de un 5,62% para el mortero de referencia (MR), mientras que para los morteros de diseño (MLH) es del 8,23% y de un 11,65% para los morteros (MLM).

5.8.2. Resistencias mecánicas

La resistencia mecánica de un material podemos definirla como la capacidad de resistir una carga sin falla, y se expresa como la carga máxima que un mortero puede soportar sin romperse (resistencia). El valor de la

resistencia se determina con un ensayo de carga uniaxial a una edad determinada.

En la práctica, la resistencia mecánica de los morteros es una propiedad de referencia, ya que el resto de propiedades tales como la permeabilidad al vapor, el módulo de elasticidad o su durabilidad, están directamente relacionadas con ella, por lo que, en muchos casos, pueden deducirse a partir de los valores de resistencia obtenidos.

Uno de los factores más determinantes en la resistencia mecánica de las mezclas son la relación agua-cemento, su compactación, el curado, la naturaleza de los áridos y su granulometría.

Para el estudio de las resistencias mecánicas a flexión y compresión a los 28 días se han preparado diez amasadas de cada uno de los morteros diseñados. Cada amasada permite rellenar tres probetas normalizadas de dimensiones (40x40x160) mm³. El número de amasadas realizado permite establecer una extrapolación de los resultados obtenidos con una dispersión mínima en el resultado final, por lo que los valores obtenidos son representativos del comportamiento de cada tipo de mortero, frente a las sollicitaciones mecánicas a las que han sido sometidos.

El método de ensayo para el estudio de las resistencias mecánicas se recoge en la Norma UNE-EN 1015-11 (AENOR 2007)³⁸³.

El procedimiento empleado para determinar las resistencias mecánicas se explica a continuación:

- Se ensayan las probetas normalizadas a flexión aplicando una carga sin aceleraciones bruscas, a una velocidad uniforme entre 10 N/s y 50 N/s en tres puntos de la probeta: los puntos extremos de apoyo separados entre ejes una longitud de 100±0,5 mm, y de un tercer punto, que transmite la carga, situado en el centro de los dos anteriores. De esta forma, la rotura se produce entre 30 y 90 segundos.

³⁸³ AENOR (2007). "UNE-EN 1015-11. Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido".

La resistencia a flexión, R_f , de cada probeta se determina mediante la siguiente expresión:

$$R_f = 1,5 \frac{F l}{bd^2}$$

Siendo F la carga máxima aplicada sobre la probeta, l la distancia entre los rodillos de apoyo en mm, b y d se pueden considerar como las dimensiones del molde.

Este ensayo se realiza sobre tres probetas fabricadas de la misma mezcla, y determina la media aritmética de los tres valores de rotura obtenidos, que será el valor de referencia de la resistencia a flexión.

- Para el análisis de la resistencia a compresión, se utilizan los dos fragmentos de probeta resultantes de la rotura a flexión. Se aplica sobre ellos una carga a velocidad constante sobre dos superficies opuestas de las probetas, de dimensiones $(40 \times 40 \pm 0,1)$ mm² y 10 mm de espesor. La resistencia a compresión se determina dividiendo la carga máxima soportada por su sección transversal, que es de (40×40) mm², según la siguiente expresión:

$$R_c = \frac{Q}{S}$$

Siendo Q , la carga máxima aplicada sobre la probeta, y S la sección transversal de la probeta en mm².



Figura 5.7: Dispositivos de determinación de las resistencias mecánicas.

El valor de la resistencia a compresión se obtiene determinando la media aritmética de los valores individuales.

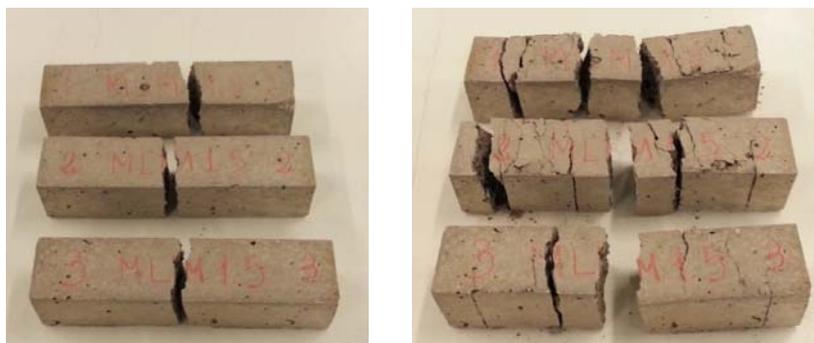


Figura 5.8: Determinación resistencia a flexión y compresión de mortero diseño MLM.

5.8.2.1. Resultados

De cada amasada de mortero se han preparado tres probetas normalizadas, ensayando para cada tipo de mortero diez amasadas a los 28 días, dos amasadas a los 90 días y otras dos amasadas a 365 días. En las Tablas 5.27, 5.28, 5.29, 5.30 y en las Gráficas 5.7 y 5.8, se muestran los valores obtenidos:

RESISTENCIAS MECÁNICAS MORTERO BASE – MB					
Tipo	Denominación	Rc 28 días (MPa)	Media (MPa)	Rf 28 días (MPa)	Media (MPa)
MB	MB-1	31,93	35,14	6,27	6,78
	MB-2	34,93		8,09	
	MB-3	33,48		7,02	
	MB-4	32,85		5,20	
	MB-5	31,97		6,57	
	MB-6	33,15		6,83	
	MB-7	37,59		7,04	
	MB-8	38,19		7,55	
	MB-9	37,67		7,53	
	MB-10	39,66		6,41	

Tabla 5.27: Resistencias mecánicas del mortero base.

RESISTENCIAS MECÁNICAS MORTERO DE REFERENCIA – MR (MPa)					
Tipo	Denominación	Rc 28 días (MPa)	Media (MPa)	Rf 28 días (MPa)	Media (MPa)
MR	MR-1	19,40	19,50	3,30	4,23
	MR-2	19,92		3,44	
	MR-3	19,68		3,17	
	MR-4	18,69		3,35	
	MR-5	18,06		5,23	
	MR-6	18,52		4,92	
	MR-7	17,89		5,08	
	MR-8	18,88		4,56	
	MR-9	19,57		4,94	
	MR-10	22,75		4,28	

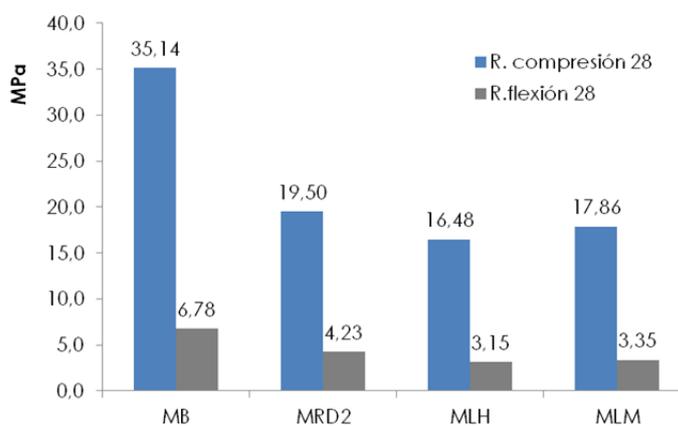
Tabla 5.28: Resistencias mecánicas del mortero de referencia.

RESISTENCIAS MECÁNICAS MORTERO DISEÑO – MLH (MPa)					
Tipo	Denominación	Rc 28 días (MPa)	Media (MPa)	Rf 28 días (MPa)	Media (MPa)
MLH	MLH-1	12,98	16,48	2,59	3,15
	MLH-2	15,90		2,96	
	MLH-3	16,46		3,05	
	MLH-4	16,96		3,59	
	MLH-5	18,92		2,88	
	MLH-6	15,05		4,16	
	MLH-7	16,50		3,30	
	MLH-8	16,20		3,96	
	MLH-9	15,38		2,52	
	MLH-10	20,40		2,53	

Tabla 5.29: Resistencias mecánicas del mortero de diseño – MLH.

RESISTENCIAS MECÁNICAS MORTERO DISEÑO – MLM (MPa)					
Tipo	Denominación	Rc 28 días (MPa)	Media (MPa)	Rf 28 días (MPa)	Media (MPa)
MLM	MLM-1	17,22	17,86	3,36	3,35
	MLM-2	17,15		2,88	
	MLM-3	15,94		3,22	
	MLM-4	17,32		2,27	
	MLM-5	17,38		4,26	
	MLM-6	18,86		4,30	
	MLM-7	19,94		2,91	
	MLM-8	18,20		2,63	
	MLM-9	18,01		3,05	
	MLM-10	18,53		4,60	

Tabla 5.30: Resistencias mecánicas del mortero de diseño – MLM.



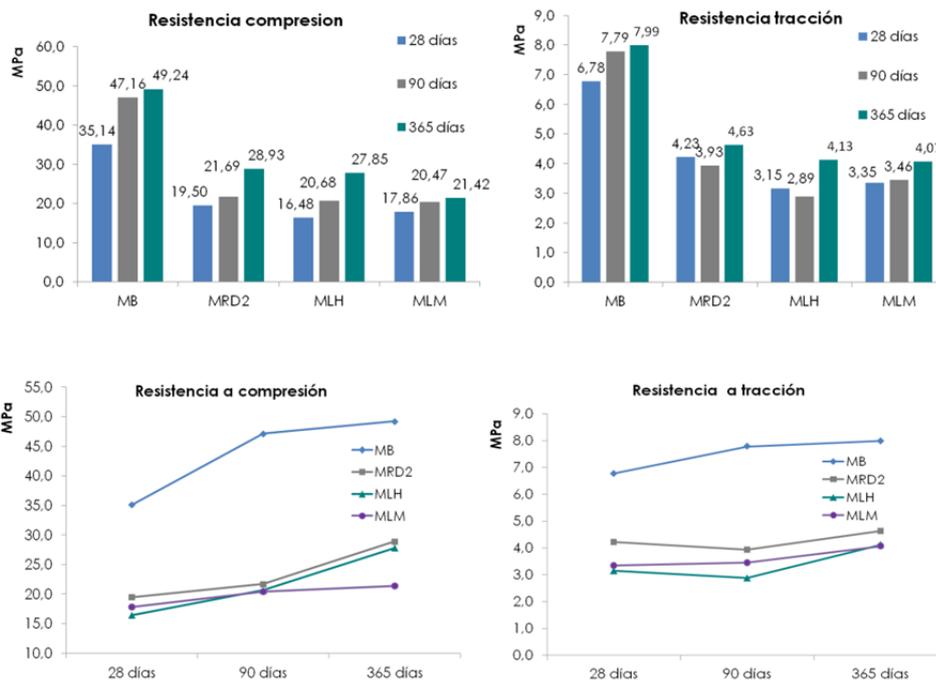
Gráfica 5.7: Resistencias mecánicas de los morteros.

Según se observa en la Gráfica 5.7, la pérdida de resistencia mecánica a compresión oscila entre el 53% y el 44%, mientras que para la resistencia a flexión la disminución varía entre el 53% y el 38%. La reducción máxima en las resistencias mecánicas se obtiene para el mortero de diseño realizado con árido reciclado de hormigón (MLH).

Esta pérdida en la resistencia a compresión supone un 44%, debido al aligeramiento del mortero base (MB), mientras que la pérdida debida a la sustitución del árido natural del mortero de referencia (MR) por áridos reciclados de los morteros de diseño, solo supone, en el peor de los casos, un

15%. Los resultados de la disminución de la resistencia a flexión, debido al aligeramiento, suponen un 38%, mientras que la sustitución del árido natural por reciclados representa, también en la situación más desfavorable, un 25%.

Para poder evaluar los efectos en las resistencias mecánicas en un periodo de tiempo razonable, se han realizado ensayos a tres meses y a un año, y se han comparado con los obtenidos a 28 días.



Gráfica 5.8: Evolución de la resistencias mecánicas a lo largo del tiempo.

El incremento de las resistencias mecánicas a los tres meses varía en función del tipo de mortero analizado. Así, si se considera la resistencia a compresión, el incremento producido es de un 34% para el mortero base (MB), de un 11% para el mortero de referencia (MR) y de un 25% y un 15% respectivamente para los morteros de diseño (MLH) y (MLM). Para las resistencias a flexión, los resultados fluctúan entre un incremento del 15% para el mortero base (MB) y un 3% para el mortero de diseño (MLM) y descensos del 7% para los morteros de referencia (MR), y del 8% para el mortero de diseño (MLH).

A los 365 días, la resistencia mecánica a compresión se incrementa un 40% respecto de la obtenida a los 28 días para los morteros base (MB) y un 4% a los 90 días. El incremento de las resistencias a flexotracción es de un 18% para las resistencias a 28 días y de un 2% para las resistencias a los 90 días.

Los morteros de referencia (MR) también mejoran sus prestaciones, tanto a compresión como a flexotracción, con incrementos del 48% para las resistencias a compresión a 28 días y del 33% a los 90 días. En el caso de las resistencias a flexotracción, se produce un incremento de un 9% a los 28 días y de un 18% a los 90 días.

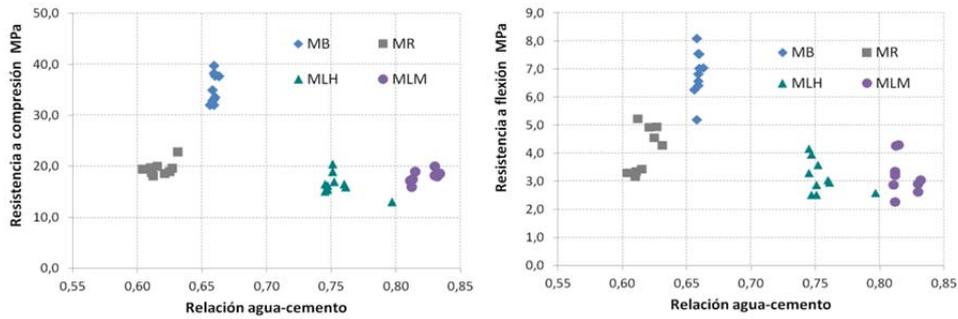
El mortero de diseño (MLH) presenta incrementos en su resistencia a compresión de un 69% sobre la obtenida a los 28 días y de un 35% a los 90 días. Su resistencia a flexotracción registra incrementos del 31% a los 28 días y de un 43% a los 90 días.

Por último, los incrementos para los morteros de diseño (MLM) son de un 20% para la resistencia a compresión a los 28 días y de un 5% para los 90 días. A flexotracción, los incrementos son del 21% para la obtenida a los 28 días y del 18% para la registrada a los 90 días.

Es importante señalar las pocas diferencias finales en la resistencia a compresión entre los morteros de referencia (MR) y el mortero base (MB), y el menor incremento registrado en la resistencia a compresión del mortero (MLM) a los 365 días.

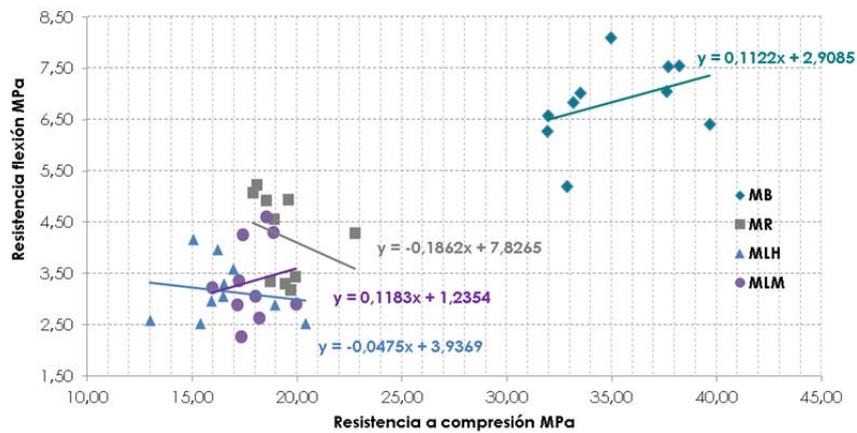
Como se puede apreciar, la disminución en las resistencias se materializa aligerando el mortero, no existiendo grandes diferencias entre las resistencias mecánicas obtenidas para el mortero de referencia (MR) y las alcanzadas por los morteros de diseño (MLH y MLM).

Si se analizan las relaciones agua-cemento con los valores de resistencia obtenidos, la disminución de la resistencia mecánica de los morteros está directamente relacionada con el aumento de la relación agua-cemento, como se pudo comprobar en la Gráfica 5.9.



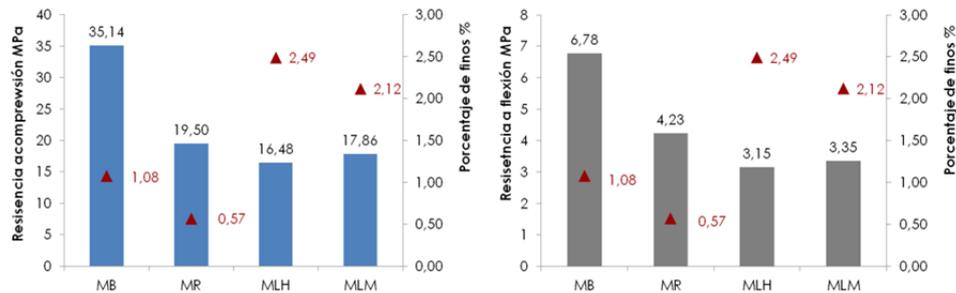
Gráfica 5.9: Resistencia a compresión y flexión en función de la relación a/c.

Se ha establecido la relación existente entre la resistencia a flexión y compresión a los 28 días para cada uno de los tipos de los morteros ensayados. Los resultados se representan en la Gráfica 5.10 como líneas de tendencia con desviaciones significativas para los morteros de referencia (MR) y de diseño (MLM y MLH).



Gráfica 5.10: Relación entre la resistencia a compresión y flexión a 28 días.

Por último, y con el objetivo de poder comparar las resistencias mecánicas de los tipos de morteros de diseño, se han relacionado las resistencias mecánicas con el porcentaje de finos de cada uno de los áridos utilizados en las dosificaciones.



Gráfica 5.11: Relación entre las resistencias mecánicas y el porcentaje de finos.

5.8.2.2. Conclusiones

Con los resultados obtenidos en los ensayos de flexión y compresión de los diferentes morteros, y las comparativas entre las resistencias mecánicas obtenidas y otras propiedades analizadas, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- El mortero de referencia (MR) presenta pérdidas de resistencia mecánica, probablemente por la discontinuidad de la granulometría del árido, al añadir la arcilla expandida. Este agregado presenta tamaños muy uniformes, circunstancia que no permiten cerrar los poros dejados por los tamaños mayores, lo que determina planos muy poco resistentes frente a fuerzas externas. Además, la propia resistencia mecánica de la arcilla expandida es baja, por lo que no contribuye a mejorar las propiedades mecánicas del mortero en su conjunto.
- La disminución de las resistencias mecánicas entre los morteros de referencia (MR) y diseño (MLH y MLM) no es importante, debido a que la cantidad del árido reciclado de las mezclas resulta poco significativa respecto del contenido en arcilla expandida. Como ya se pudo comprobar en los estudios realizados al propio material, la disminución se justifica por la presencia de mortero adherido a la superficie de los áridos reciclados, lo que determina un mortero más poroso y ligero,

como se confirma por su densidad, afectando de forma directa a su resistencia mecánica.

- La disminución de las resistencias mecánicas es mayor en los morteros de diseño, dosificados con árido reciclado de hormigón (MLH), que en los fabricados con árido de naturaleza mixta (MLM), contrariamente a los estudios consultados en el Estado del Arte. Este comportamiento se puede justificar por la propia granulometría del árido reciclado, la menor densidad del árido utilizado y por el distinto porcentaje de finos.
- Salvo en los morteros de referencia (MR), en el resto de mezclas se puede establecer una relación entre la resistencias mecánicas obtenidas y la relación agua-cemento. Como se puede observar, la resistencia mecánica disminuye al incrementarse la relación agua-cemento. En los morteros de referencia (MR) la adición de la arcilla expandida, y sus características hace que no se cumplan estas premisas.

5.8.3. Retracción

Se han realizado el ensayo de los cambios de longitud para ver la evolución de la expansión en el tiempo, y determinar cómo influye el aligeramiento y la adición de árido reciclado en este comportamiento.

El ensayo de los cambios de longitud se ha hace de acuerdo con la Norma UNE 83.318:94 (AENOR 1994)³⁸⁴.

Para cada uno de los tipos de mortero se han fabricado tres probetas, obteniéndose la retracción como el valor medio de la deformación de ellas. Para este ensayo se han utilizado moldes prismáticos de (100x100x275) mm³, perforados lateralmente, a los que se acopla en su interior unas piezas

³⁸⁴ AENOR (1994). "UNE 83.318:94. Ensayos de hormigón. Determinación de los cambios de longitud".

metálicas (tetones de medida), sujetas con un tornillo desde el exterior del molde.

Las probetas de mortero se compactaron mediante picado con barra, teniendo especial cuidado para no desplazar los tetones de medida.

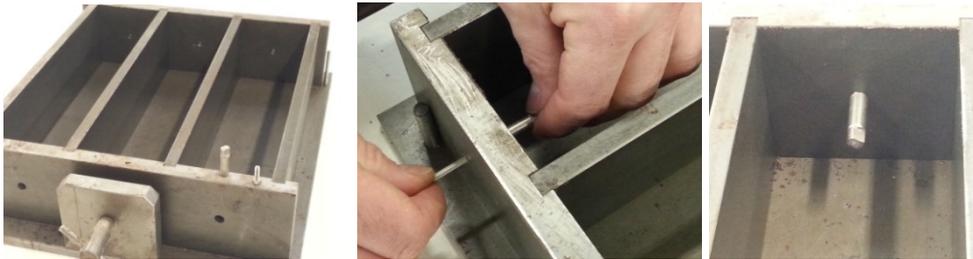


Figura 5.9 Molde prismático y colocación de tetones de medida.

Una vez amasadas las probetas se introducen los moldes en la cámara curado con una humedad ambiental igual o superior al 90% y una temperatura de $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$. Se retiran las probetas de los moldes con una edad de $(23\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2})$ horas, contadas a partir del momento en el que se adicionó el agua de amasado. Antes de desmoldar las probetas se retiran los tornillos que fijan los tetones de medida, con cuidado para no golpear ni ejercer presión sobre ellos.

Las probetas se sumergen en agua a una temperatura de $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ durante 30 minutos, tras lo cual se extraen del agua y se secan superficialmente con una bayeta. En esta situación, se realiza la medida inicial de longitud.

Posteriormente, se curan las probetas a una temperatura de $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ hasta los 28 días, realizándose una segunda medida de la longitud. A continuación, las probetas se dejan al aire en el laboratorio, realizándose medidas a los 4, 7, 14 y 28 días y a las 12 y 28 semanas.

Para medir la longitud de las probetas se ha utilizado un extensómetro con precisión de 1 micra. Antes de realizar la medición, el extensómetro debe calibrarse al comienzo y final del proceso mediante una barra de calibrado.

Tomando como medida la longitud inicial de la probeta al salir de la cámara de curado, la medida de 1 micra corresponde a una precisión de deformación de 3,64 micras/metro, ya que la base de medida es de 275 mm.

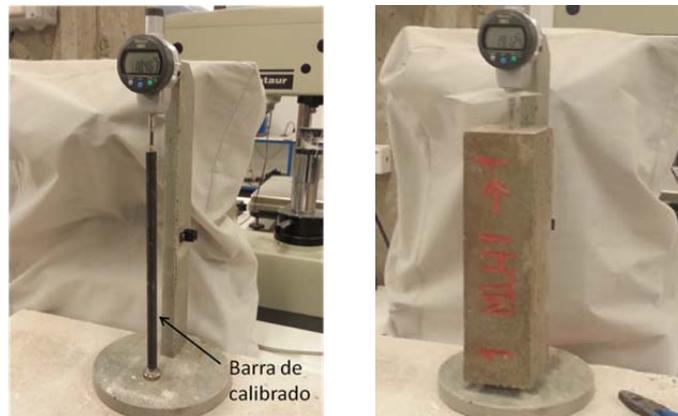


Figura 5.10: Extensómetro y barra de calibrado.

La retracción o expansión de las probetas se calcula según la siguiente expresión:

$$\xi_d = \frac{100 \times (l_f - l_0)}{l_0}$$

Siendo:

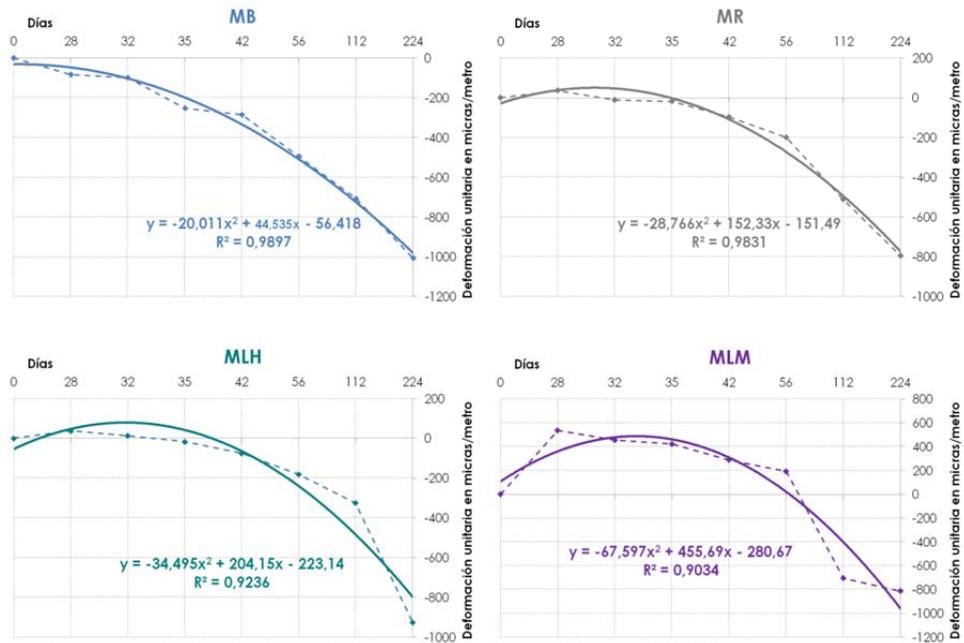
ξ_d retracción o expansión.

l_f longitud de la base medida en cada edad del ensayo.

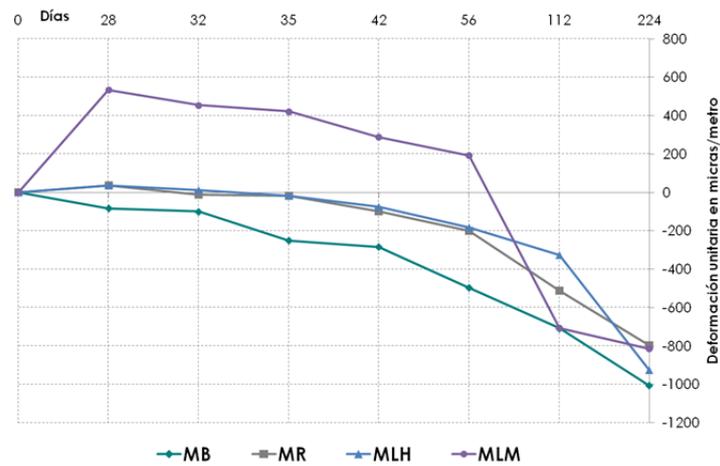
l_0 longitud inicial de la base de medida a la retirada de la probeta del molde.

5.8.3.1. Resultados

Los cambios producidos por expansión o contracción de la longitud de las probetas de los morteros ensayados se recogen en la Gráfica 5.12 y 5.13.



Gráfica 5.12 : Evolución de los cambios dimensionales en el tiempo de los diferentes morteros diseñados.



Gráfica 5.13: Evolución de los cambios dimensionales en el tiempo.

5.8.3.2. Conclusiones

Excepto el mortero base, el resto de morteros ensayados presentan expansiones a los 28 días, probablemente debidas al curado de las probetas en agua, circunstancia que puede inducir fenómenos de entumecimiento.

Cuando el mortero se sumerge en el agua, experimenta un aumento de peso y un incremento de volumen como consecuencia de la adsorción de agua por los geles procedentes del cemento hidratado, que al contrario que en la retracción por secado, tienden a esponjarse, produciendo este hinchamiento.

Salvo en los morteros de diseño fabricados con áridos reciclados mixtos (MLM), en el resto de morteros los valores de expansión son relativamente pequeños, por lo que podemos considerar que la expansión producida se debe a los fenómenos de entumecimiento, mientras que en el caso de los (MLM) se pueden deber tanto al entumecimiento como a la formación de etringita.

La etringita es un sulfato-aluminato cálcico hidratado cristalino, que se forma en la hidratación del cemento portland y su presencia en la pasta endurecida afecta, en sí misma, la durabilidad del mortero (Skalny, Johansen et al. 1996)³⁸⁵. Se estructura a partir de las reacciones producidas entre los aluminatos y los sulfatos. La cantidad de sulfatos solubles en ácido del árido reciclado mixto (5,12%) influye en que dichas expansiones sean muy superiores a las del resto de los morteros. Existen estudios realizados sobre hormigones con áridos reciclados mixtos donde se analiza la expansión debida al contenido de sulfatos en los que, tras los ensayos, se concluye que el incremento de la expansión producida es proporcional al contenido en sulfatos (Geraldés 2013)³⁸⁶.

Las retracciones se comienzan a manifestar en todos los morteros excepto en los morteros de diseño MLM, a partir de que las probetas son dejadas al aire, después del curado, llegándose a que después de los 224 días todos los morteros presentan retracciones muy similares.

³⁸⁵ Skalny, J., V. Johansen, N. Thaulow and A. Palomo (1996). "Una forma de ataque por sulfatos." *Materiales de Construcción* 46(244)

³⁸⁶ Geraldés, V. L. (2013). "Estudio de hormigones reciclados no estructurales fabricados con árido reciclado mixto: propiedades mecánicas y expansión debida al contenido en sulfatos". Universidad Politécnica de Madrid.

Salvo en el mortero de diseño (MLM), en el resto de morteros las retracciones comienzan a manifestarse a partir de su exposición al aire después del proceso de curado.

Las mayores retracciones se observan en el mortero base (MB) en todas las edades ensayadas, presentando valores muy similares los morteros de referencia (MR) y los morteros de diseño (MLH).

5.8.4. Tomografía axial computerizada (TAC)

La tomografía axial computerizada (TAC), se ha utilizado para determinar la distribución de los macroporos (tamaño superior a 170 μm), y la distribución interior de cada uno de los componentes que forman los morteros, con especial atención a la distribución de la arcilla expandida.

El TAC es una técnica basada en el análisis computacional de una secuencia de imágenes obtenidas por rayos X, mediante la cual obtenemos una imagen tridimensional de la estructura interna de las matrices pétreas a escala real, identificándose los poros de diámetro superior a 170 μm (Manso, Rodríguez et al. 2011)³⁸⁷.

El equipo consta de un sistema de rayos X con un tubo Yxlon de 225 Kv/30 mA con cabinas metálicas de acero-plomo-acero, de forma que operando con una radiación máxima de 225 Kv/30 mA dentro de la cabina, la dosis de radiación no excede de 2,5 $\mu\text{S/h}$, a una distancia de 100 mm.

5.8.4.1. Resultados

El tratamiento de los datos se ha realizado con el software Mimics 10.0, que permite identificar densidades de diferentes materiales por colores, pudiéndose observar tanto la forma como la distribución de éstos.

En las Figuras 5.11 y 5.12, se puede observar la distribución de los materiales en una sección axial de las probetas, en las que el color rojo

³⁸⁷ Manso, J. M., Á. Rodríguez, Á. Aragón and J. J. González (2011). "The durability of masonry mortars made with ladle furnace slag." *Construction and Building Materials* 25(8): 3508-3519.

corresponde a los poros, el azul a la arcilla expandida y el gris a la pasta de cemento.

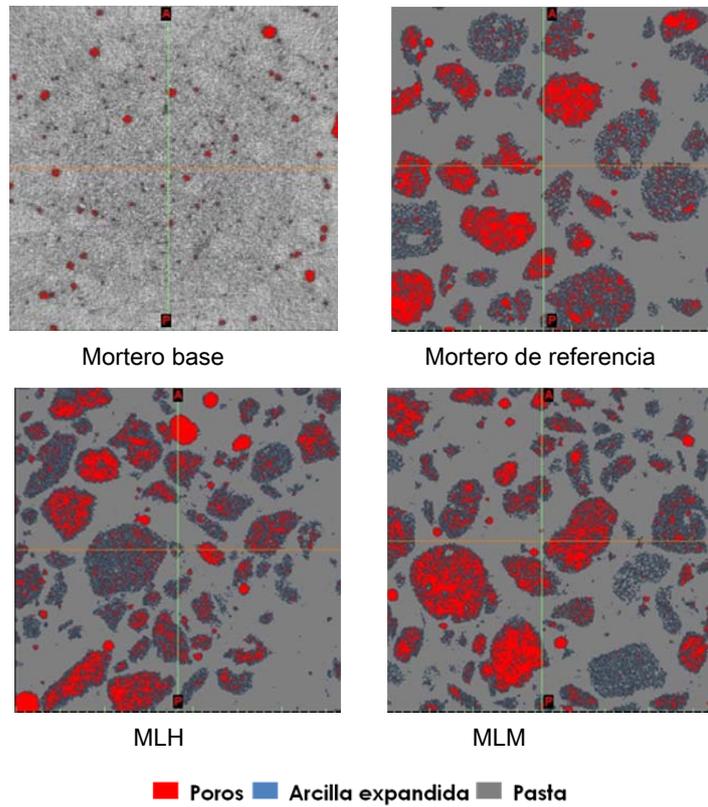


Figura 5.11: Sección axial de los morteros.

Con la misma secuencia de colores se han reconstruido las probetas prismáticas. En ellas se puede apreciar la distribución de los macroporos dentro de la matriz cementosa, la distribución de la arcilla expandida y el resultado de la mezcla de todos los componentes.

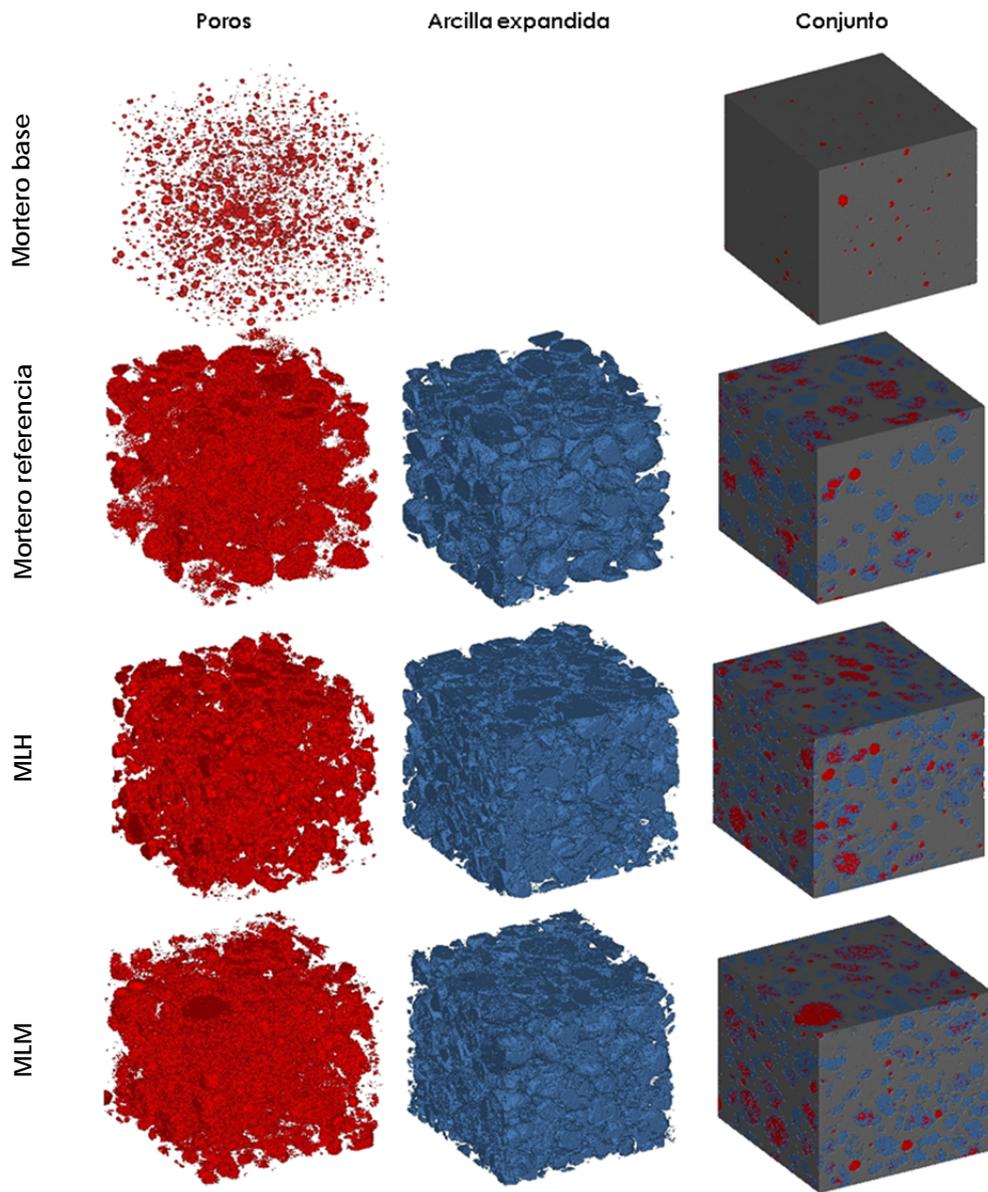


Figura 5.12: Imágenes TAC. Poros, arcilla expandida y pasta.

5.8.4.2. Conclusiones

Se puede observar la distribución homogénea de los materiales que componen cada una de las mezclas, el aumento de la porosidad del mortero de referencia (MR) y el de los morteros de diseño (MLH y MLM), por la inclusión de la arcilla expandida.

También se puede apreciar con nitidez la elevada porosidad que presenta la arcilla expandida y la presencia de pasta de cemento en el interior de alguno de los gránulos de esta, al ser también porosos.

Aunque se ha tratado de cuantificar numéricamente la porosidad, la obtención de resultados no ha sido posible, ya que, al ser un procedimiento analítico valorativo aproximado, los valores obtenidos son poco fiables e imprecisos.

Sí que podemos afirmar que, tal y como se demuestra en estudios procedentes (Mehta and Monteiro 2006)³⁸⁸, existe una relación inversa entre la porosidad del material y su resistencia.

5.8.5. Porosimetría de intrusión de mercurio (PIM)

La porosidad de morteros y hormigones es una de las propiedades más importantes por la posible penetración de agentes agresivos al interior del material. El estudio de la estructura de los poros en los morteros y hormigones es fundamental para comprender la importancia de esta característica tiene en el comportamiento físico-mecánico.

La técnica MIP tiene limitaciones, puesto que considera poros cilíndricos, no tiene en cuenta los cuellos de botella y en algunos casos resulta destructiva, produciéndose grietas y dando resultados erróneos. No obstante, en la mayoría de los casos, aporta información muy valiosa sobre la estructura de los materiales.

La determinación de la porosidad mediante Porosimetría por Intrusión de Mercurio (MIP) analiza los microporos del material. El procedimiento operatorio comienza realizando el vacío sobre las muestras, para posteriormente aplicar una presión hidrostática con mercurio a la cámara que contiene la muestra. La presión de intrusión de mercurio resulta inversamente proporcional al tamaño de la abertura del poro, los valores de presión aplicada

³⁸⁸ Mehta, P. K. and P. J. M. Monteiro (2006). "Concrete: microstructure, properties and materials". New York

y el volumen acumulado de mercurio intrusado, dan lugar a representaciones gráficas del proceso de llenado, lo que permite representar los volúmenes acumulativos, diferenciales y la porosidad porcentual estimada a partir de la ecuación de Washburn, que supone modelos cilíndricos de poros. La ecuación de Washburn describe el equilibrio entre las fuerzas internas y externas de un sistema trifásico sólido-líquido-vapor en función de tres parámetros: tensión superficial, ángulo de contacto y geometría de la línea contacto sólido-líquido-vapor.

Los parámetros fundamentales que se obtienen de la PIM son tres: la porosidad total, el diámetro del poro y la distribución de la estructura porosa.

La porosidad total es el volumen de poros respecto al volumen total, dónde sólo se tienen en cuenta los poros que están conectados, según la siguiente expresión:

$$P_t = \frac{V_p}{V_m} \cdot 100$$

Siendo:

P_t Porosidad total (%).

V_p Volumen de poros (mm³).

V_m Volumen de material (mm³).

El diámetro promedio del poro es el diámetro correspondiente asumiendo una distribución cilíndrica equivalente, y se determina según la siguiente ecuación:

$$\phi = \frac{4 V}{A}$$

Siendo:

ϕ Diámetro de poro promedio (mm).

V Volumen de poros (mm³).

A Superficie del material (mm²).

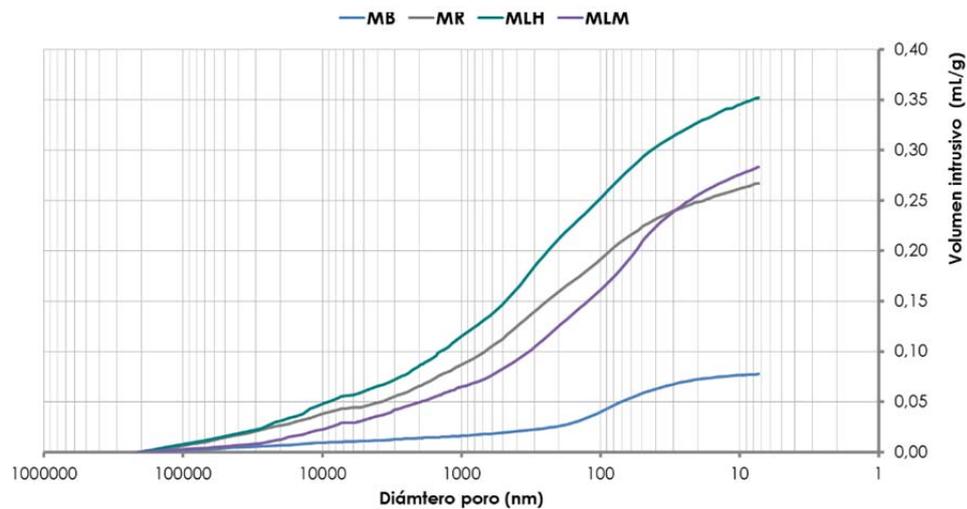
5.8.5.1. Resultados

Los resultados de los valores de la microporosidad, y las características morfológicas de los poros se muestran en Tabla 5.13.

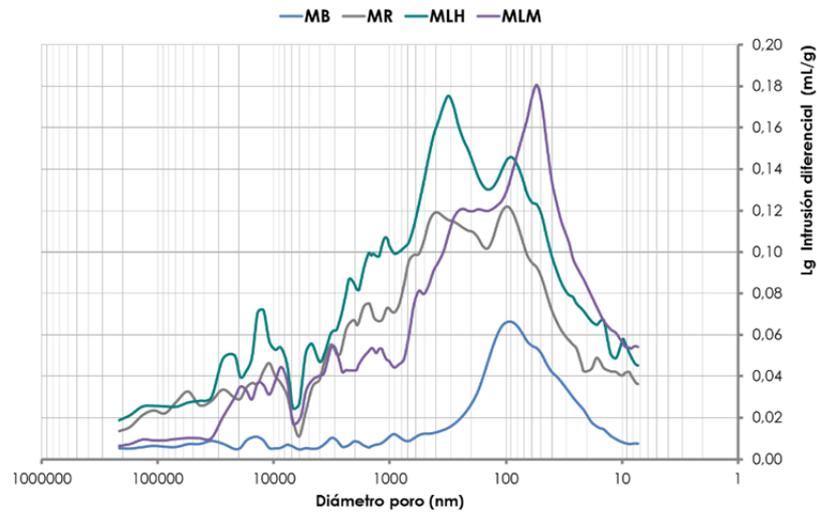
POROSIMETRÍA DE INTRUSIÓN DE MERCURIO					
Tipo	ϕ mín. (nm)	ϕ máx. (nm)	ϕ prom.(nm)	ϕ crítico (nm)	Microp.MIP (%)
MB	7,30	214.679,00	62,80	92,40	15,99
MR	7,30	214.750,70	82,00	97,24	37,01
MLH	7,30	241.912,80	81,30	312,64	43,36
MLM	7,30	214.886,50	57,70	54,03	39,20

Figura 5.13: Porosimetría de intrusión de mercurio MIP.

En las Gráficas 5.14 y 5.15 se muestra el volumen acumulado de los morteros ensayados y el pico máximo de la curva de distribución, que indica el diámetro crítico, es decir, muestra el tamaño del poro que más veces se repite de forma continuada, y que se corresponde con la pendiente de la curva del volumen intrusivo.



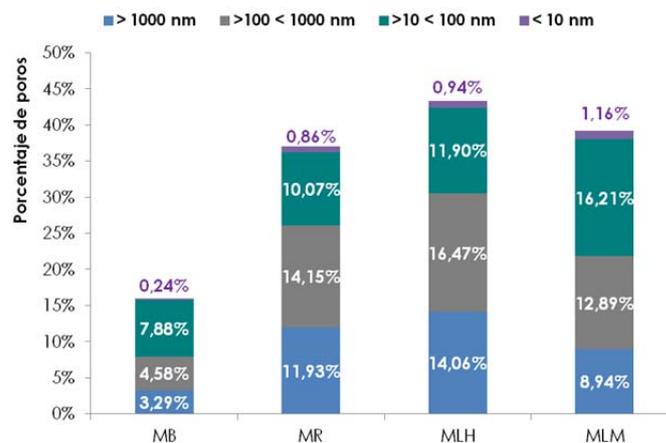
Gráfica 5.14: Curvas de volumen intrusivo acumulado.



Gráfica 5.15: Curvas derivadas del volumen intrusivo.

La Gráfica 5.16 compara la distribución del volumen total intrusivo de poros, donde los rangos de porosidad son:

- $d > 1.000 \text{ nm}$: aire de los poros.
- $1.000 < d < 100 \text{ nm}$: capilares grandes, con mayor efecto en procesos de transporte, y menor efecto en la hidratación Clinker.
- $100 < d < 10 \text{ nm}$: capilares medios que afectan a la permeabilidad.
- $d < 10 \text{ nm}$: capilares pequeños que afectan a la trabajabilidad.



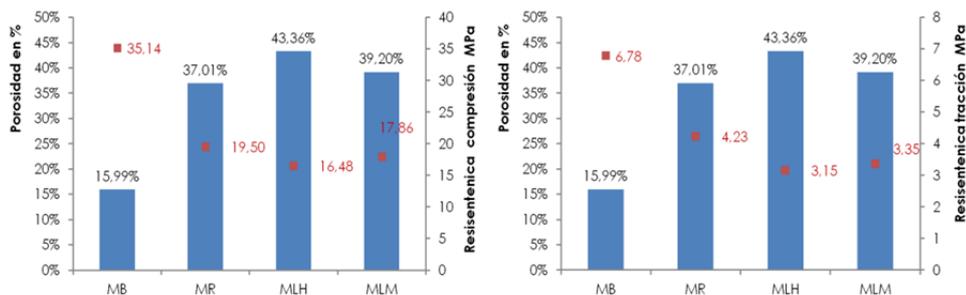
Gráfica 5.16: Distribución del volumen total intrusivo de poros.

5.8.5.2. Conclusiones

Podemos concluir que la adición de la arcilla expandida y de los áridos reciclados aumenta la porosidad, como consecuencia de las características físicas de ambos agregados. El mayor incremento de la porosidad se manifiesta en los morteros con adición de áridos reciclados de hormigón (MLH), y existe muy poca diferencia entre los morteros aligerados con arcilla expandida (MR), y los morteros con áridos reciclados mixtos (MLM).

El poro crítico presenta valores muy similares entre el mortero base (MB) y el mortero de referencia (MR), con un aumento muy considerable de este en los morteros de diseño con árido reciclado de hormigón (MLH) y una disminución acusada en los morteros de diseño con árido reciclado mixto (MLM).

También se ha relacionado en la Gráfica 5.17 la porosidad con las resistencias mecánicas, observándose que a media que la porosidad aumenta, los valores de las resistencias mecánicas disminuyen. Esto explicaría como con un árido de mejor calidad, como la del árido reciclado de hormigón (MLH), se obtienen resistencias mecánicas inferiores a las de los morteros realizados con áridos reciclados mixtos (MLM).



Gráfica 5.17: Relación entre la porosidad y las resistencias mecánicas.

5.8.6. Absorción de agua

La absorción de agua de un mortero se puede estudiar desde varios puntos de vista, comprobando la cantidad de agua que puede atravesar un mortero cuando existe una diferencia de presión entre sus caras. Es lo que se conoce como permeabilidad, y se da sobre todo en morteros de revestimiento

o en las juntas. También se puede determinar la cantidad de agua que un mortero adsorbe por las fuerzas de atracción entre el líquido y su red capilar. Esta valoración se denomina absorción capilar del mortero o absorción por capilaridad.

La permeabilidad depende de las condiciones climatológicas y del diseño de las fábricas y cerramientos, mientras que en la absorción capilar se da con más frecuencia como consecuencia de las humedades presentes en el terreno. Si un mortero es permeable transmitirá el agua hacia el interior, con la consiguiente aparición de las humedades por filtración. Esta situación se puede agudizar si junto al agua se introducen sales, que pueden cristalizar en el interior (criptoflorescencias) y aumentar de volumen, produciendo abombamientos en los revestimientos o bien las típicas manchas superficiales en los paramentos, lo que modifica el color y tonalidad de éstos.

Para el determinar la absorción de agua por capilaridad en los morteros endurecidos utilizamos la Norma UNE-EN 1015-18 (AENOR 2003)³⁸⁹.

Para cada uno de los tipos de mortero se han fabricado tres amasadas de tres probetas prismáticas normalizadas de dimensiones (40x40x160) mm³, colocando en el fondo de los moldes un papel absorbente. Una vez enrasados los moldes se coloca otro filtro igual al anterior protegiendo el mortero, y se introducen las probetas en cámara húmeda para su curado durante 28 días.

Una vez curadas se desecan en estufa a una temperatura de (60±5)°C hasta masa constante y se dejan enfriar a temperatura ambiente.

Se impregnan las caras laterales con parafina, dejando las bases diáfanos para permitir el paso del agua por succión. Una vez enfriada la parafina se rompen a flexión, obteniendo dos trozos aproximadamente iguales de cada probeta.

³⁸⁹ AENOR (2003). Norma UNE-EN 1015-18. "Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido".

Por último, se introduce cada trozo en un jaula metálica con la cara exenta de parafina hacia abajo y se sumergen en agua entre 5 a 10 mm. Una vez embebidas las probetas en agua se toma referencia de su peso a los 10 y 90 minutos de iniciado el ensayo.

Concluido el ensayo de absorción por capilaridad, las probetas se seccionan a lo largo su cara mayor para medir la altura de la penetración del agua en el centro de la probeta.

El coeficiente de abosrción por capilaridad es igual a la pendiente de la recta que une los puntos representativos de las medidas tomadas a los 10 y 90 minutos, mediante la siguiente expresión:

$$C = 0,1 (M_2 - M_1) \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$$

Siendo:

M_2 el peso de la muestra a los 90 minutos.

M_1 el peso de la muestra a los 10 minutos.



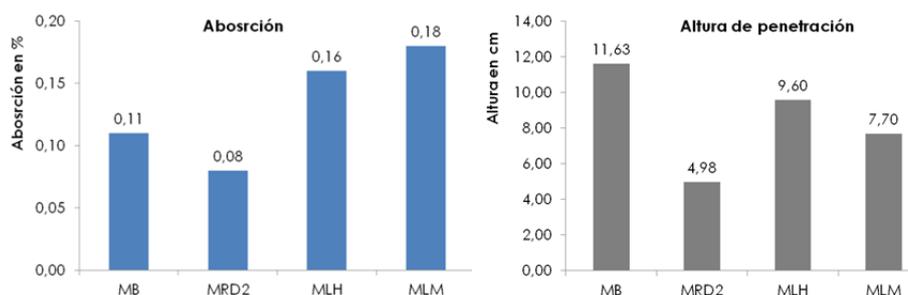
Figura 5.14: Proceso determinación del absorción por capilaridad y altura de penetración.

5.8.6.1. Resultados

En la Tabla 5.31 se recogen los coeficientes de permeabilidad junto con la altura de penetración del agua, calculadas según el procedimiento descrito en el apartado anterior.

Mortero	Absorción (%)	Altura (mm)
Mortero Base	0,11	11,63
Mortero de referencia	0,08	4,98
Mortero de diseño MLH	0,16	9,60
Mortero de diseño MLM	0,18	7,70

Tabla 5.31: Absorción por capilaridad de los morteros y altura de penetración.



Gráfica 5.18: Coeficientes de absorción y altura de penetración.

5.8.6.2. Conclusiones

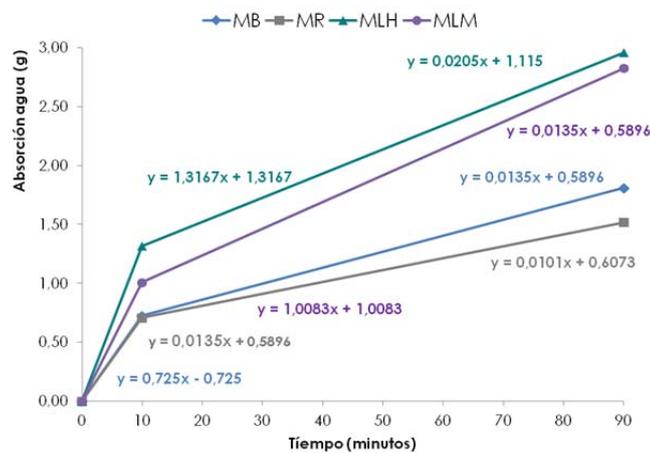
Existe una gran dispersión en los resultados obtenidos en los cuatro tipos de morteros analizados, por lo que sería necesario un estudio más profundo, o variar la metodología y analizar la absorción a un plazo de tiempo mayor.

Los coeficientes de absorción son más elevados en los morteros de diseño, debido a la mayor absorción que presentan los áridos reciclados respecto del árido natural. El mortero base (MB) presenta una mayor absorción que el mortero de referencia (MR), debido probablemente a la influencia de la absorción de las arcillas expandidas.

Las alturas de penetración también siguen este mismo patrón, siendo más altas en el mortero base (MB) que las del mortero de referencia (MR) y los morteros de diseño (MLH y MLM). Por otra parte, aumentan entre el mortero

de referencia (MR) y los de diseño (MLH y MLM) debido a la mayor absorción del árido reciclado.

En la Gráfica 5.19 se muestran las pendientes de las líneas de 0 a 10 minutos y de 10 a 90 minutos para las diferentes dosificaciones de morteros analizadas. Se constata la elevada absorción inicial en los morteros de diseño tipo MLH y MLM, y la gran similitud entre los morteros de referencia (MR) y los morteros base (MB).



Gráfica 5.19: Pendiente línea de absorción de agua 0-10 minutos y 10-90 minutos.

5.9. DURABILIDAD

5.9.1. Capilaridad – Método Fagerlund

Para cuantificar la succión capilar de hormigones o morteros se determina el coeficiente de absorción capilar K, que representa la velocidad de succión capilar a la cual un fluido asciende por la estructura interna del hormigón o mortero.

Varios estudios han abordado esta propiedad, encontrando en la mayoría de los casos que la succión de los hormigones fabricados con áridos reciclados es mayor que la de un hormigón con árido natural. Este incremento

varía entre el 3,7% (Katz 2003)³⁹⁰ y el 7,12% (Gómez Sobreron 2002)³⁹¹, siendo mayor conforme se incrementa el porcentaje de árido reciclado y disminuyendo a medida que aumenta la edad (Olorunsogo and Padayachee 2002)³⁹². Sin embargo, otras investigaciones presentan similares resultados para la succión, tanto en el caso de hormigones con áridos reciclados como en los convencionales (Khatib 2005)³⁹³.

Dada la disparidad de los resultados obtenidos en los coeficientes de absorción por capilaridad de los morteros de acuerdo con el procedimiento de la Norma UNE-EN 1015-18, se decide realizar el ensayo de succión capilar siguiendo la metodología descrita en la Norma UNE-83982 (AENOR 2008)³⁹⁴. El procedimiento consiste en medir el cambio de peso de una muestra que se encuentra sumergida 5 mm en agua en uno de sus extremos.

Para cada dosificación se utilizan 2 probetas de (100x100x100) mm³, de una misma amasada, para garantizar la uniformidad de los resultados. Las probetas se cortan por la mitad y se acondicionan de acuerdo al procedimiento de la Norma UNE-83966 (AENOR 2008)³⁹⁵. Las probetas se secan en una estufa a una temperatura de (50±2)°C durante 4 días. Posteriormente se envuelven en un film de polietileno impermeable, asegurando la estanqueidad del envoltorio mediante 3 vueltas completas del plástico, y se introducen de nuevo en la estufa a la misma temperatura

³⁹⁰ Katz, A. (2003). "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete." *Cement and Concrete Research* 33(5): 703-711.

³⁹¹ Gómez Sobreron, J. M. V. (2002). "Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study." *Cement and Concrete Research* 32(8): 1301-1311.

³⁹² Olorunsogo, F. T. and N. Padayachee (2002). "Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes." *Cement and Concrete Research* 32(2): 179-185.

³⁹³ Khatib, J. M. (2005). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement and Concrete Research* 35(4): 763-769.

³⁹⁴ AENOR (2008). UNE 83982. "Durabilidad del hormigón. Determinación de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido. Método Fagerlund".

³⁹⁵ AENOR (2008). Norma UNE-83966. "Durabilidad del hormigón. Acondicionamiento de las probetas de hormigón para los ensayos de permeabilidad a gases y capilaridad".

durante otros tres días. El sellado tiene por objeto la redistribución de la humedad para que ésta se homogenice en el interior de las probetas.

Trascurridos los tres días se sacan las probetas de la estufa y se introducen en una cámara de secado a $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ y 65-75% de humedad relativa durante 21 días para completar su fraguado.

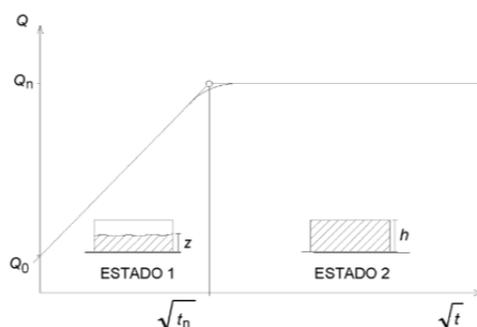
Después de acondicionar las probetas se introducen en un recipiente y se disponen sobre unos apoyos rígidos no absorbentes, para asegurar un contacto entre la probeta y el agua de, al menos, el 95%. Se vierte agua dentro del recipiente con cuidado de no mojar las superficies, hasta conseguir una lámina de agua de (5 ± 1) mm. El nivel del líquido se debe mantener durante todo el tiempo que dure el ensayo, añadiendo agua si fuese necesario.

Se determina el peso de las probetas en diferentes intervalos de tiempo (5 min., 10 min., 15 min., 30 min., 1 h., 2 h., 4 h., 6 h., 24 h., 48 h., 72 h., 96 h, etc.), hasta que la diferencia entre dos pesadas consecutivas, espaciadas mínimo 24 horas, sea inferior al 0,1%.



Figura 5.15: Preparación probetas y probetas en recipiente con agua.

En la Gráfica 5.20 se representa una curva típica de absorción de agua en el hormigón o mortero endurecido, al relacionarse el incremento de masa (Q) con la raíz cuadrada del tiempo (\sqrt{t}). La curva obtenida se caracteriza por presentar dos estados: uno inicial donde se relaciona el llenado de agua por absorción a través de los poros capilares, y un segundo estado que se corresponde con la continuidad de este llenado a través de los poros, mediante el proceso de difusión y disolución de aire.



Gráfica 5.20: Curva típica de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido.

El punto de intersección observado en la figura se obtiene del encuentro de las rectas ajustadas a cada periodo de referencia, en los estados 1 y 2, e indica el momento en el que el frente de agua alcanza la superficie superior de la probeta. Así, Q_0 es la masa de la probeta al iniciar el ensayo y Q_n el peso correspondiente a la intersección de las rectas, es decir, el momento en el que alcanza la saturación, que se corresponde un tiempo $\sqrt{t_n}$.

El cálculo del coeficiente de absorción por capilaridad K ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$) viene dado por la siguiente expresión:

$$K = \frac{\delta_a \varepsilon_e}{10 \sqrt{m}} \quad \text{Donde} \quad \varepsilon_e = \frac{Q_n - Q_0}{A \cdot h \cdot \delta_a} \quad \text{y} \quad m = \frac{t_n}{h^2}$$

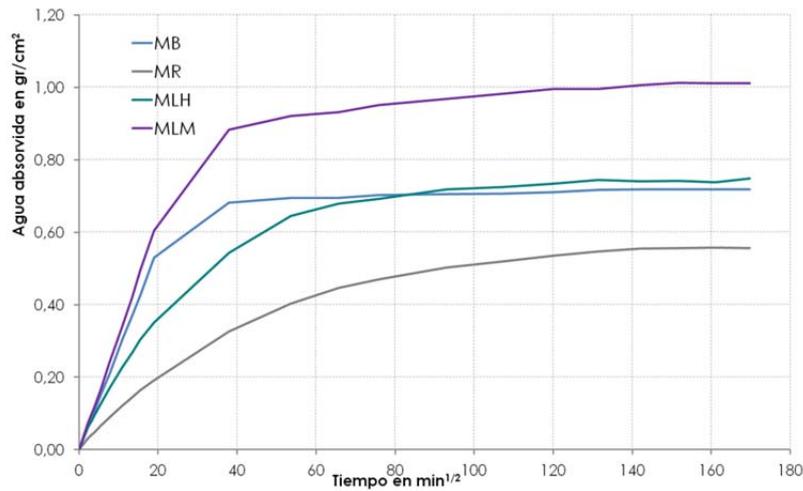
Donde δ_a es la densidad del agua (considerada 1g/cm^3), ε_e es la porosidad efectiva del mortero, m es la resistencia a la penetración del agua por absorción capilar (min/cm^2), A es la sección de la probeta en cm^2 y h su espesor en cm .

El coeficiente de absorción capilar y la resistencia a la penetración de Agua son parámetros que están relacionados entre sí de forma directa y que dependen de la estructura de los poros. El valor de k se ve afectado por la porosidad total (Martínez, Etxeberria et al. 2013)³⁹⁶.

³⁹⁶ Martínez, I., M. Etxeberria, et al. (2013). "A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars." *Construction and Building Materials* 49(0): 384-392.

5.9.1.1. Resultados

En la Gráfica 5.21 se representan las curvas obtenidas para los diferentes tipos de morteros, siguiendo el procedimiento descrito en el apartado anterior, donde cada curva corresponde a la media de las dos muestras ensayadas.



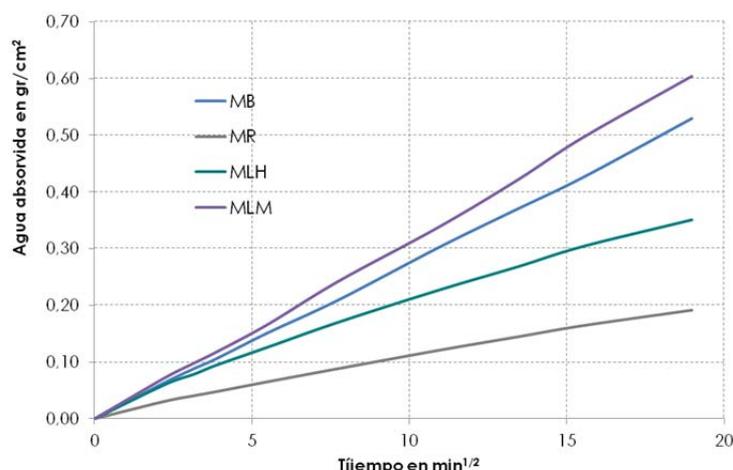
Gráfica 5.21: Absorción capilar de los morteros con 20 días de edad.

5.9.1.2. Conclusiones

Las curvas para el mortero base (MB), y el mortero de diseño con árido reciclado de hormigón (MLH) presentan un comportamiento similar. El mayor valor de absorción lo presentan los morteros de diseño con árido reciclado mixto (MLM), y el menor valor lo presentan los morteros de referencia (MR).

Los coeficientes de absorción son más elevados en los morteros de diseño, debido a la mayor absorción que presentan los áridos reciclados. El mortero base (MB) presenta mayores Coeficientes de Absorción que el mortero de referencia (MR), debido probablemente a la adición de las arcillas expandidas.

En la Gráfica 5.22 se representan los coeficientes de absorción por capilaridad a edades tempranas.

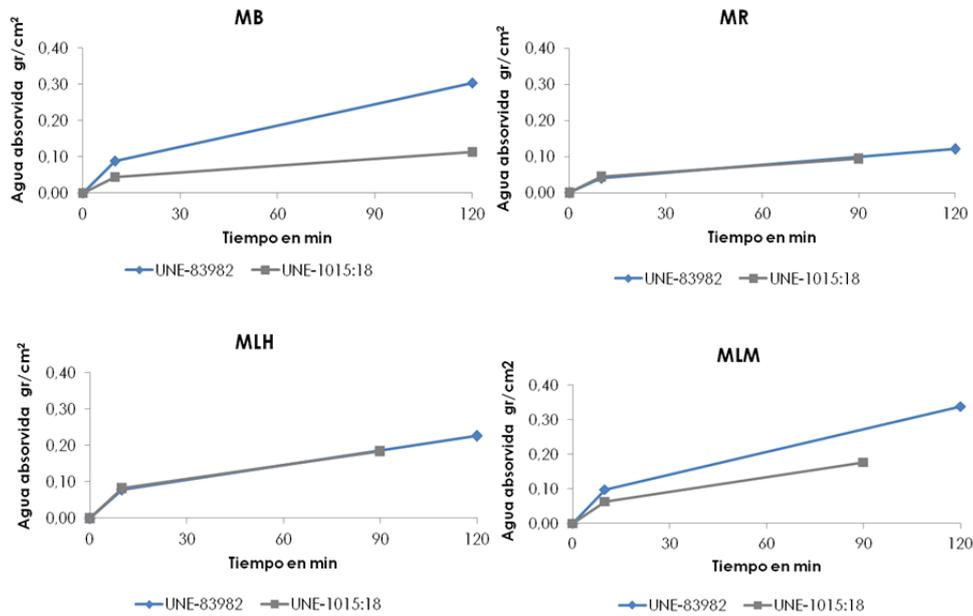


Gráfica 5.22: Resultados de las primeras 6 horas del ensayo de succión capilar.

Como se puede observar, hasta los 30 minutos las curvas se encuentran casi solapadas, excepto para los morteros de referencia (MR). El mortero de diseño (MLM) y el mortero base (MB) presentan sus gráficas muy similares hasta las 6 h, mientras que el mortero de diseño (MLH), se separa de las gráficas anteriores a partir de los 15 minutos, al contener un árido reciclado de mayor calidad, no obstante, como se observa en la Gráfica 5.21, a partir del 4 día prácticamente se solapa con la curva del mortero base (MB).

Si se comparan las gráficas de los coeficientes de absorción por capilaridad obtenidos de acuerdo con el procedimiento de la Norma UNE 1015-18 a los 10 y 90 minutos, con los coeficientes de absorción capilar determinados de acuerdo con la metodología desarrollada en la Norma UNE 83982, se obtiene la Gráfica 5.23.

Como se puede comprobar, los resultados obtenidos son homogéneos para los morteros de referencia (MR) y los morteros de diseño fabricados con árido reciclado de hormigón (ARH). Por el contrario, el mortero base (MB) y el mortero de diseño (MLM) presentan valores superiores por el procedimiento de la Norma UNE 83982. La dispersión de resultados obtenidos mediante el procedimiento operatorio de la Norma UNE-1015-18 puede justificar este comportamiento, circunstancia que no se da en el caso de los ensayos realizados de acuerdo con el procedimiento de la Norma UNE 83982.



Gráfica 5.23: Comparativa resultados absorción capilar según UNE 83982 y UNE 1015:18.

5.9.2. Resistencia a la abrasión

La dureza se define como la fuerza interna que impide que un material sea rayado o penetrado por otra más duro.

Cuando un mortero u hormigón es utilizado como pavimento, se producen fenómenos de rayado o de penetración por la acción de fuerzas externas que se proyectan sobre él. Como consecuencia, el material se desgasta o rompe por la fricción generada o por los impactos producidos, produciéndose una pérdida de material que afecta tanto a las características estéticas como funcionales del pavimento, reduciéndose su vida útil. Por otro lado, el fenómeno de desgaste del pavimento puede aumentar también su resistencia al deslizamiento (Hosking 1992)³⁹⁷.

³⁹⁷ Hosking, R. (1992). "Road aggregates and skidding". TRL, London.

Se ha demostrado que la resistencia a la abrasión depende principalmente de variables como su resistencia a compresión, las características de los áridos o el tipo de acabado (Laplante, Aitcin et al. 1991)³⁹⁸.

No existe norma UNE sobre el método de abrasión para morteros o hormigones, por lo que se ha adaptado la Norma UNE-EN 14157 (AENOR 2004)³⁹⁹. En esta norma se recogen tres métodos de ensayo, por lo que, para este trabajo de investigación, se ha escogido el del “disco de abrasión ancho”.

El método de análisis se basa en la huella producida en la probeta de mortero al ser sometida al rozamiento de un disco junto con un material abrasivo. La máquina de abrasión consta de un disco giratorio de abrasión y una tolva con válvula para regular la salida del material abrasivo, una tolva de guía de flujo, un carro portaprobetas y un contrapeso.

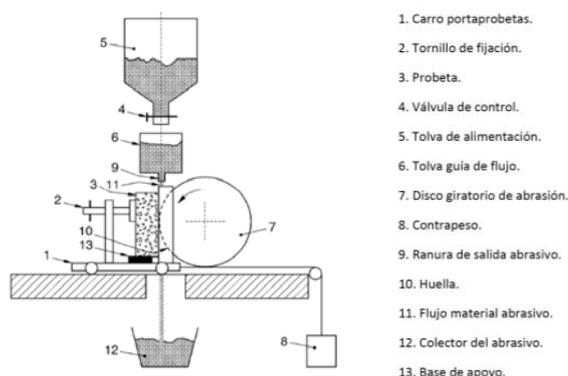


Figura 5.16: Esquema de la máquina de abrasión.

Las probetas tienen forma de baldosa cuadrada con unas dimensiones de (100x100) mm². Para realizar el ensayo las probetas deben estar secas, por lo que, una vez transcurrido el proceso de fraguado, se introducen en estufa a una temperatura de (70±5)°C hasta masa constante. Las probetas se

³⁹⁸ Laplante, P., P. Aitcin, et al. (1991). "Abrasion Resistance of Concrete." *Journal of Materials in Civil Engineering* 3(1): 19-28.

³⁹⁹ AENOR (2004). Norma UNE-EN 14157. "Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a abrasión".

colocan en la máquina de abrasión sobre el carro portaprobetas, de forma que la huella producida por el material abrasivo se encuentre a más de 15 mm de los bordes y se fija en la base de apoyo para que permita el paso del material abrasivo por abajo.

Se pone en marcha el disco giratorio y se abre la válvula de control y se activa el motor, debiendo alcanzar el disco giratorio 75 revoluciones en 60 segundos. Se debe comprobar de manera visual que se produce el flujo del material abrasivo. Una vez finalizadas las 75 revoluciones, se paran el flujo de abrasivo y el motor. Como las dimensiones de las probetas lo permiten, se realizarán dos ensayos en cada una de ellas.



Figura 5.17: Máquina de abrasión (derecha). Probeta colocada para su ensayo (izquierda).

Para realizar la medición de la huella se dibujan con un lápiz los límites longitudinales extremos de ésta utilizando una regla y se traza una línea en la mitad de la huella, midiendo con un calibre posicionado sobre los puntos A y B. Para calibrar se toma la medida a 10 mm de los extremos en los puntos C y D.

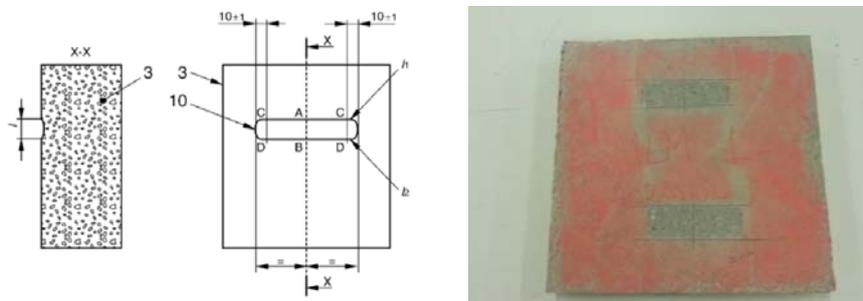


Figura 5.18: Medición de la huella.

Cuanto menor es el valor de la anchura de la huella, mayor será la resistencia al desgaste.

5.9.2.1. Resultados

Los valores de la huella producida en cada uno de los morteros ensayados se recogen en la Tabla 5.32 y Gráfica 5.19.

RESISTENCIA A LA ABRASIÓN			
Tipo	Huella (mm)	Media (mm)	Variación respecto MB (%)
MB	24,30	23,90	-
	23,60		
	23,80		
	23,90		
MR	14,30	14,40	-39,75%
	13,80		
	15,00		
	14,50		
MLH	17,90	18,33	-23,31%
	18,50		
	18,80		
	18,10		
MLM	24,60	23,65	-1,05%
	22,70		
	23,20		
	24,10		

Tabla 5.32: Resistencia a la abrasión.

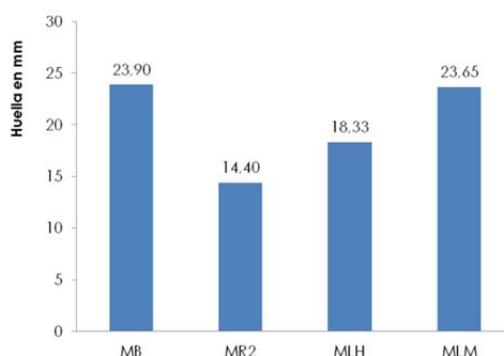


Figura 5.19: Resistencia a la abrasión de los morteros.

5.9.2.2. Conclusiones

De los resultados podemos concluir que la resistencia a la abrasión del mortero base (MB), y del mortero de diseño con árido reciclado mixto (MLM), son prácticamente similares. La adición de arcilla expandida de los morteros de referencia (MR), aumenta considerablemente la resistencia a la abrasión del mortero base. Por el contrario, la inclusión de los áridos reciclados la disminuye, siendo menor el valor cuanto peor es la calidad del árido, tal y como se hacen referencia los estudios consultados (Laplante, Aitcin et al. 1991; Hosking 1992)^{400 401}.

Aunque, en teoría, a una menor resistencia mecánica le corresponde una baja resistencia a la abrasión, en el caso de los morteros de referencia (MR) se obtienen buenas prestaciones frente al desgaste, probablemente como consecuencia del acabado superficial que proporciona la adición de la arcilla expandida. Existen estudios consultados en los se afirma que la resistencia a compresión no influye sobre la resistencia a la abrasión (Kettle and Sadegzadeh 1987)⁴⁰². Sin embargo, otros destacan la influencia que tiene la calidad del acabado superficial, como por ejemplo el espolvoreado sobre el pavimento fresco aplicado antes del proceso de pulido (Tarun R. Naik and Mohammad)⁴⁰³.

5.9.3. Resistencia al dióxido de azufre. Ensayo Kesternich

Los morteros pueden llegar a estar expuestos a la acción de un conjunto de agentes agresivos producidos por los gases de los combustibles fósiles, como el petróleo o el carbón cuando estos se utilizan como carburantes para vehículos, calefacciones o industrias.

⁴⁰⁰ Laplante, P., P. Aitcin, et al. (1992). "Abrasion Resistance of Concrete." *Journal of Materials in Civil Engineering* 3(1): 19-28.

⁴⁰¹ Hosking, R. (1992). "Road aggregates and skidding". TRL, London.

⁴⁰² Kettle, R. J. and M. Sadegzadeh (1987). "Field investigations of abrasion resistance." *Materials and Structures* 20(2): 96-102.

⁴⁰³ Tarun R. Naik, S. S. Singh, et al. (1995). "Abrasion Resistance of High-Strength Concrete Made with Class C Fly Ash." *Materials Journal* 92(6).

El dióxido de azufre es uno de los contaminantes más peligrosos y de los más abundantes en las zonas urbanas. Su proceso patológico comienza por su oxidación, transformándose en trióxido de azufre. Posteriormente, si se combina con el agua de lluvia se transforma en ácido sulfúrico (lluvia ácida).

Por este motivo, es preciso determinar la durabilidad de los morteros cuando se encuentran en ambientes industriales o en núcleos urbanos con importantes concentraciones de polución.

Para el estudio de esta característica se ha utilizado el método descrito en la Norma UNE-EN ISO 6988 (AENOR 2004)⁴⁰⁴. Este ensayo no es específico de ningún material concreto, pero es perfectamente válido para los morteros en ambientes agresivos o situados al exterior. Esta Norma UNE-EN ISO 6988 coincide con la Norma Alemana DIN 50018: "Ensayos de corrosión en atmósferas húmedas saturadas con adición de dióxido de azufre", que se conoce como "Ensayo de Kesternich".

Para la realización del ensayo introducimos las probetas en una cámara estanca de 300 dm³, en la que simularemos una atmosfera industrial añadiendo al aire 0,2 litros de óxido de azufre (SO₂). El número de ciclos realizado ha sido de 15, sobre probetas normalizadas de forma prismática de dimensiones de (40x40x160) mm³, distribuidos cada uno de ellos de la forma siguiente: exposición de las probetas en el interior de la cámara cerrada durante 8 horas a (40±2)°C con aire, en el que se introducen 0,2 litros de óxido de azufre con una humedad relativa del 100%. Transcurrido estas 8 horas, la puerta de la cámara se abre automáticamente y se exponen las probetas a temperatura ambiente durante 16 horas. El ensayo concluye cuando se observa un deterioro evidente en las piezas, o bien cuando se completan los ciclos.

La resistencia al dióxido de azufre se evalúa mediante tres procedimientos: variación del peso, inspección visual de las probetas anotando la existencia

⁴⁰⁴ AENOR (1985). UNE-EN ISO 6988. "Ensayo de dióxido de azufre con condensación general de humedad".

de signos de degradación, y mediante la variación de las resistencias mecánicas.



Figura 5.20: Cámara para el ensayo de Kesternich.

5.9.3.1. Resultados

La relación de pesos antes y después del ensayo para cada uno de los tipos de morteros ensayados se muestra en la Tabla 5.33.

VARIACIÓN DEL PESO (gr)					
Tipo	Antes	Media	Después	Media	Variación
MB	542,37	544,06	546,90	548,40	0,80%
	545,75		549,90		
MR	343,58	345,25	349,10	350,80	1,61%
	346,91		352,50		
MLH	303,08	303,99	310,40	311,60	2,51%
	304,89		312,80		
MLM	282,62	282,94	291,30	292,20	3,27%
	283,25		293,10		

Tabla 5.33: Variaciones del peso. Ensayo Kesternich.

Las variaciones de las resistencias mecánicas producidas se muestran en Tabla 5.34.

VARIACIÓN DE LAS RESISTENCIAS MECÁNICAS						
Tipo	Resistencia flexión (MPa)			Resistencia compresión (MPa)		
	Antes	Después	Variación	Antes	Después	Variación
MB	8,77	8,75	-0,23%	42,94	39,18	-8,76%
MR	4,70	4,63	-1,49%	18,75	16,54	-11,79%
MLH	3,66	3,60	-1,64%	16,63	14,47	-12,99%
MLM	3,38	3,27	-3,25%	18,85	15,83	-16,02%

Tabla 5.34: Variaciones de las resistencias mecánicas. Ensayo Kesternich.

También se realizaron mediciones de las resistencias mecánicas de las probetas mediante ultrasonidos, antes y después del ensayo. El método de control de la resistencia mecánica mediante impulsos generados mecánicamente aparece en los Estados Unidos en los años 1940.

Su principio se basa en que la velocidad de la onda a través del mortero u hormigón depende de las propiedades elásticas, y que es casi independiente de la geometría de la estructura estudiada.

Actualmente el método mide el tiempo que emplea un impulso ultrasónico (frecuencia entre 20 y 150 KHz) al recorrer la distancia entre un transductor emisor T_x , y un transductor receptor R_x , ambos acoplados al mortero u hormigón que se está estudiando. Mediante un transductor electroacústico se genera un impulso de vibración longitudinal.

Después de recorrer una determinada distancia L , un segundo transductor recibe la señal, y por medio de un circuito electrónico se mide el tiempo de tránsito o propagación del impulso a través del material (ver figura 5.21). La velocidad de transmisión o velocidad de propagación se determina en cada caso por el cociente entre la distancia o separación L entre los transductores y el tiempo de tránsito T para esta distancia.

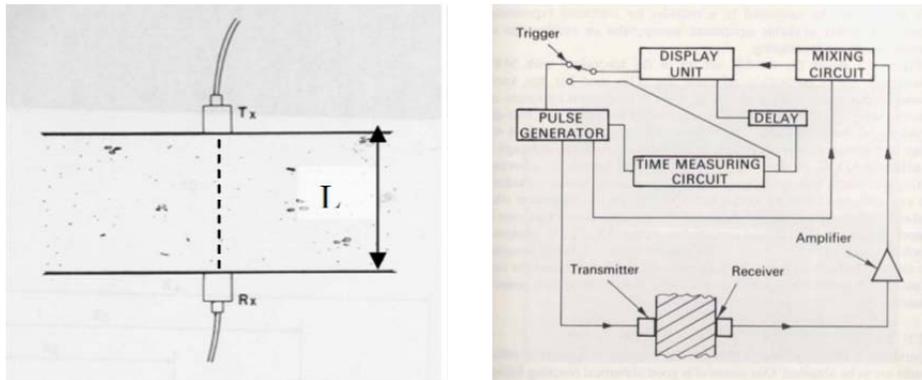


Figura 5.21: Esquema del ensayo y principio de funcionamiento del método ultrasónico.

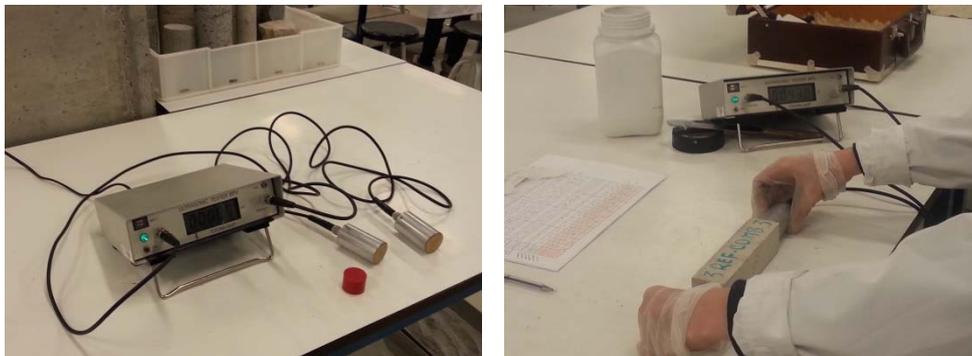


Figura 5.22: Equipo ultrasonidos y toma de datos.

Los resultados de las variaciones tomadas mediante ultrasonidos para cada uno de las dosificaciones realizadas se refleja en la Tabla 5.35.

VARIACIÓN DE LAS RESISTENCIAS MECÁNICAS			
Método de ultrasonidos			
Tipo	Antes ensayo (MPa)	Después ensayo (MPa)	Variación %
MB	46,05	43,63	-5,26%
MR	57,75	51,26	-11,23%
MLH	63,57	55,86	-12,12%
MLM	67,37	58,40	-13,32%

Tabla 5.35: Variaciones en la velocidad de propagación. Ensayo Kesternich.

5.9.3.2. Conclusiones

De la inspección visual realizada a las probetas después de los 15 ciclos no se ha apreciado ningún signo relevante de degradación, lo que podría indicar que ninguna de las dosificaciones estudiadas resulta afectada por la atmósfera sulfurosa.

Del análisis de la variación de masa se puede concluir que existen pequeñas desviaciones respecto de la masa inicial. La adición de la arcilla expandida provoca un ligero aumento de la masa, siendo éste mayor en los morteros de diseño por la incorporación de áridos reciclados. Este incremento está relacionado con la calidad del árido utilizado, ya que los morteros de diseño con árido reciclado de hormigón (MLH) aumentan su masa en menor cuantía que los realizados con áridos reciclados mixtos (MLM), lo cual parece indicar que éstos pueden haber experimentado alguna alteración, al estar sometidos al ambiente agresivo de dióxido de azufre.

Los resultados de las resistencias mecánicas, comparados con los obtenidos en las probetas de referencia no sometidas al ensayo y pertenecientes a la misma amasada, muestran una disminución. Los valores obtenidos son algo menores en el ensayo de resistencia a flexotracción, pero mayores en el ensayo de resistencia a compresión, siendo esta disminución mayor cuanto peor es la calidad del árido reciclado.

Se puede afirmar que la adición de la arcilla expandida no influye de manera sustancial en la disminución de resistencias mecánicas, mientras que la sustitución del árido natural por árido reciclado si tiene relevancia cuando se trata de árido reciclado mixto (ARM), mientras que para el árido de mejor calidad prácticamente no influye.

Si se comparan las variaciones de las resistencias obtenidas por ultrasonidos y mediante rotura de las probetas, los resultados presentan valores similares de disminución.

5.9.4. Comportamiento frente a ciclos de humedad-sequedad

Mediante este ensayo podemos valorar el comportamiento de los morteros cuando están sometidos a ciclos alternos de inmersión en agua y posterior

secado al aire. De esta forma se puede evaluar el comportamiento del mortero frente a inclemencias climatológicas, cuando se producen cambios en el clima de forma continuada.

Para evaluar la durabilidad de los morteros se utilizan tres probetas normalizadas de (40x40x160) mm³ de cada tipo de mortero prescrito. Una vez realizado el curado de las mismas en cámara húmeda durante 28 días, se han sometido a 8 ciclos, con una duración de 21 días/ciclo efectuando mediciones del peso de las mismas para determinar su variación en el tiempo y poder detectar posibles alteraciones en el material.

Cada ciclo del ensayo al que se someten las probetas consta de tres fases: 2 días de secado y 5 días sumergidas en agua. Al final de las tres fases, se efectúan los controles de peso sumergido y peso saturado. Se creyó conveniente que las probetas estuviesen 5 días sumergidas para conseguir una buena saturación de las mismas. La duración total de estos 8 ciclos ha sido de 7 meses.

Para mantener sumergidas las probetas se ha utilizado un recipiente de plástico, cerrado herméticamente para reducir la evaporación y evitar la posible caída o vertido de sustancias ajenas al ensayo durante el desarrollo de todos los ciclos. El nivel del líquido se ha manteniendo con una lámina de 3 cm de altura de agua por encima de la cara superior de las probetas, durante todo el ensayo.

El peso de las probetas se ha medido mediante balanza con una precisión de 0,1 gr, tomándose el peso saturado con superficie seca y el peso sumergido. En la realización de la medición del peso sumergido se ha utilizado la misma balanza, colocando en la parte inferior del bastidor un cesto que cuelga de la balanza y que queda sumergido en el agua.

El nivel del agua del recipiente que contiene el agua donde se sumerge el cesto debe comprobarse que sea siempre el mismo, ya que, en caso contrario las mediciones sufren alteraciones de hasta ± 4 gr. Al no esperarse alteraciones importantes, es necesaria una elevada precisión.



Figura 5.23: Probetas sumergidas. Báscula para determinar el peso de las probetas.

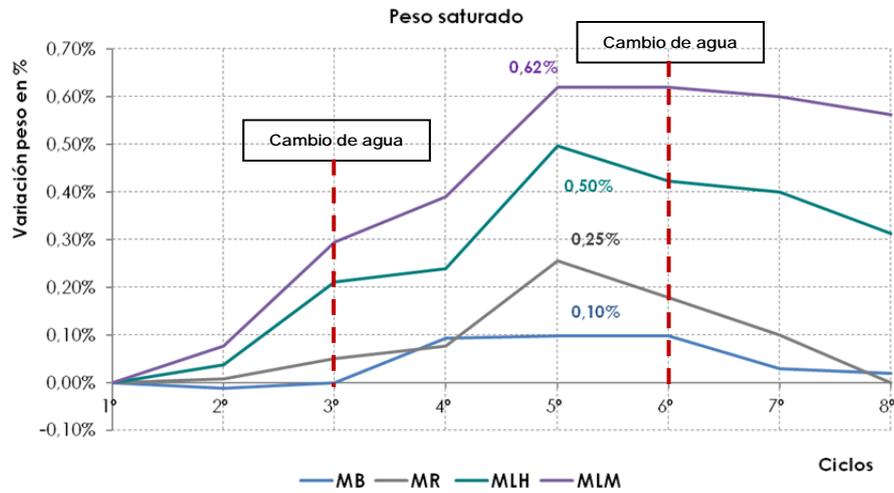
Una vez concluido el ensayo se estudian las probetas de cada uno de los morteros prescritos, comprobando los siguientes parámetros: variaciones de pesos, inspección ocular de las probetas determinando la existencia de pérdidas de material, desconchados, fisuras, grietas, etc.

5.9.4.1. Resultados

En las Tablas 5.36 y 5.37 y en la Figuras 5.24 y 5.25 se muestran los resultados obtenidos en las probetas ensayadas.

VARIACIÓN DEL PESO SATURADO (gr)									
Ciclo	1	2	3	4	5	6	7	8	Varia.
MB	575,80	575,50	575,70	576,70	576,10	576,10	575,70	575,50	0,03%
	569,70	569,60	569,60	569,90	570,20	577,10	569,50	569,90	
	579,30	579,50	579,50	579,80	580,20	580,30	580,10	579,90	
MR	394,60	394,80	394,90	395,00	395,70	395,40	394,50	394,70	0,00%
	398,70	398,60	398,80	398,90	399,50	399,20	398,30	398,70	
	383,60	383,60	383,80	383,90	384,70	384,40	383,20	383,50	
MLH	368,10	368,20	368,80	368,80	369,70	369,50	368,20	369,10	0,1%
	355,30	355,50	356,10	356,30	357,30	357,10	356,20	356,50	
	363,90	364,00	364,70	364,80	365,70	365,30	364,70	365,10	
MLM	344,20	344,60	345,30	345,60	346,50	346,50	346,00	346,30	0,56%
	351,50	351,70	352,40	352,70	353,50	353,50	352,90	353,40	
	352,90	353,10	354,00	354,40	355,10	355,10	354,50	354,80	

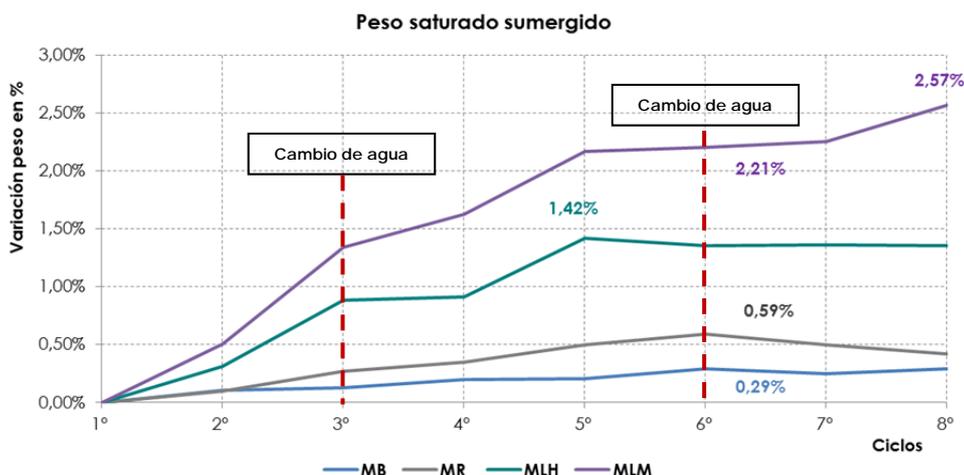
Tabla 5.36: Evolución peso saturado de los morteros sometidos a ciclos de humedad-sequedad.



Gráfica 5.24: Variación porcentual peso saturado de los morteros sometidos ciclos humedad-sequedad.

VARIACIÓN DEL PESO SATURADO SUMERGIDO (gr)									
Ciclo	1	2	3	4	5	6	7	8	Varia.
MB	319,70	320,10	320,10	320,30	320,30	320,60	320,30	320,40	0,29%
	316,60	316,90	317,00	317,20	317,20	317,50	317,00	317,70	
	325,60	325,90	326,00	326,30	326,40	326,60	326,40	326,60	
MR	134,10	134,80	135,00	135,10	135,30	135,40	134,40	135,20	0,42%
	140,60	140,80	140,90	141,00	141,20	141,40	140,00	141,20	
	128,40	128,40	128,80	128,90	129,10	129,20	127,90	128,90	
MLH	113,10	113,50	114,00	114,00	114,50	114,50	113,60	114,40	1,35%
	98,80	99,10	99,70	99,80	100,40	100,40	99,50	100,30	
	105,70	106,00	106,70	106,70	107,20	107,00	106,30	107,20	
MLM	89,10	89,60	90,40	90,70	91,20	91,20	90,60	91,40	2,57%
	93,10	93,60	94,20	94,40	94,90	95,00	94,50	95,50	
	94,40	94,80	95,70	96,00	96,50	96,50	95,90	96,80	

Tabla 5.37: Evolución peso saturado sumergido de los morteros sometidos a ciclos de humedad-sequedad.



Gráfica 5.25: Variación porcentual peso saturado sumergido de los morteros sometidos ciclos humedad-sequedad.

Una vez concluido el ensayo y después de desecadas las probetas, se comprobó si éstas habían resultado deterioradas, determinando la posible presencia de desconchados, fisuras, laminaciones o grietas. Todas las probetas mostraban un ligero color blanquecino, pero no se observaron alteraciones significativas. En la Tabla 5.38 se recoge la inspección realizada.

COMPROBACIÓN ORGANOLÉPTICA ENSAYO HUMEDAD-SEQUEDAZ				
Tipo	Desconchados	Fisuras	Laminaciones	Grietas
MB	No	No	No	No
MR	No	No	No	No
MLH	No	No	No	No
MLM	No	No	No	No

Tabla 5.38: Comprobación organoléptica morteros sometidos ciclos humedad-sequedad.

5.9.4.2. Conclusiones

Las variaciones de peso experimentadas no son especialmente relevantes, ya que los valores se pueden considerar como marginales. La evolución del peso de las probetas presenta ligeros incrementos, tanto en saturado como en sumergido hasta el 5º ciclo, más acusados en los morteros de diseño fabricados con áridos reciclados. A partir del 5º ciclo se estabilizan o experimentan pequeñas disminuciones. Este comportamiento se explica por

las reacciones de hidratación que se producen en los componentes mineralógicos de los morteros, que para un mortero normal pueden llegar a producirse hasta seis meses después de su fabricación, lo que justificaría el progresivo aumento durante este periodo. La disminución que se produce en los últimos ciclos puede ser debida al lavado y disolución de los componentes solubles de los morteros prescritos.

Después de los ciclos 3º y 6º se observan menores incrementos del peso y ligeras disminuciones, que pueden atribuirse a que la renovación de agua en el que están sumergidas las probetas, la cual facilita la disolución de los componentes del mortero.

Los morteros ensayados no presentan alteraciones significativas en su aspecto externo, no evidenciándose ningún desconchado, fisura, laminación o grietas en las superficies exteriores de las probetas.

5.9.5. Comportamiento frente a solución salina

El deterioro inducido por soluciones salinas afectan a todos los materiales constructivos y es uno de los agentes de deterioro más agresivo, frecuente y efectivo en obras de interés histórico. El mecanismo de alteración es mayor cuanto más poroso sea el material.

Los morteros pueden sufrir deterioros por la tensión que producen las sales al cristalizar en el interior de estos. El origen de estas sales puede estar en los propios materiales que conforman los morteros, como las arenas de playa, áridos contaminados, aguas duras, aditivos o los cementos con álcalis. En otros casos, las sales proceden de las condiciones ambientales, como atmósferas industriales o terrenos con altas concentraciones de sales disueltas, que mediante capilaridad pueden transferirse al interior de los morteros. En último término, son determinados materiales en contacto con los morteros, como piezas cerámicas o piezas prefabricas de cemento con concentraciones altas de sales, las que pueden realizar su aportación.

No existe normativa específica para determinar el comportamiento frente a la cristalización de las sales solubles, por lo que se ha adaptado la Norma

UNE-EN 12370 (AENOR 1999)⁴⁰⁵ para piedras naturales, dada la analogía entre materiales con una estructura similar.

El procedimiento operatorio de esta norma valora el comportamiento de los morteros prescritos frente a la acción de las sales cristalizadas, después de someterlos a 15 ciclos de ensayo. Cada ciclo se realiza sobre tres probetas normalizadas de dimensiones (40x40x160) mm³ para cada mortero prescrito. Las probetas, una vez completado su proceso de fraguado, se secan hasta masa constante en estufa de secado, registrando los pesos correspondientes en cada caso. Posteriormente, se introducen en una disolución de sulfato sódico decahidratado (Na₂SO₄(H₂O)₁₀) al 14% durante 2 horas. Transcurrido ese tiempo, se introducen en una estufa durante 16 horas a una temperatura de (105±5)°C. Se dejan enfriar durante 6 horas, y se vuelven a introducir en la solución salina.

Terminados los 15 ciclos las probetas se lavan cuidadosamente y se secan a masa constante para volverlas a pesar.

Este ensayo es altamente agresivo, ya que mediante el secado se provoca la cristalización de las sales, que aumentan considerablemente su volumen. Si se observa un deterioro excesivo del material se detiene el ensayo y se registran los ciclos efectuados.



Figura 5.24: Probetas sumergidas en solución salina y proceso de enfriamiento.

⁴⁰⁵ AENOR (1999). Norma UNE-EN 12370. "Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de sales".

Una vez completados los 15 ciclos se evalúa la afección de las sales considerando los siguientes parámetros: variación del peso inicial de la probeta y su peso concluido los 15 ciclos, observación organoléptica de las alteraciones superficiales de las probetas, pérdidas de materia, aristas romas, etc. y por último, la variación producida en sus resistencias mecánicas. Para comparar, se han dejado probetas testigo de cada uno de los morteros prescritos, de las mismas amasadas de las probetas sometidas al ensayo.

5.9.5.1. Resultados

En la Tabla 5.39 se recogen los resultados obtenidos para cada uno de los morteros prescritos.

VARIACIÓN DEL PESO (gr)					
Tipo	Antes	Media	Después	Media	Variación
MB	533,60	539,87	555,20	554,87	2,78%
	531,40		553,30		
	534,60		556,10		
MR	330,90	328,27	359,30	357,50	8,91%
	326,30		355,10		
	327,60		358,10		
MLH	282,20	280,90	310,80	309,83	10,30%
	274,80		315,50		
	285,70		303,20		
MLM	284,50	284,70	310,05	314,52	10,47%
	283,30		315,90		
	286,30		317,60		

Tabla 5.39: Evolución de peso de los morteros sometidos soluciones salinas.

Concluido el ensayo, se comprobó si las probetas habían resultado deterioradas, determinando la pérdida de materia, aristas romas, desconchados, fisuras, grietas etc. A modo de resumen, se recogen en la Tabla 5.40 y en la Figura 5.29 los resultados de la inspección realizada.

COMPROBACIÓN ORGANOLÉPTICA				
Tipo	Pérdidas materia	Aristas romas	Fisuras	Aspecto general
MB	No	No	No	Bueno
MR	No	No	No	Bueno
MLH	No	Esquina	No	Bueno
MLM	Muy pequeñas	Esquinas	Ligeras	Bueno

Tabla 5.40: Comprobación organoléptica morteros sometidos soluciones salinas.



Figura 5.25: Probetas después ensayo soluciones salinas. Imagen superior probetas no alteradas. Imagen inferior probetas con fisuras.

La variación de la resistencia mecánica de los morteros prescritos, tomando como referencia las probetas patrón, se muestra en la Tabla 5.41.

VARIACIÓN DE LAS RESISTENCIAS MECÁNICAS						
Tipo	Resistencia flexión (MPa)			Resistencia compresión (MPa)		
	Antes	Después	Variación	Antes	Después	Variación
MB	6,88	7,28	9,01%	34,24	67,89	98,27%
MR	4,45	2,23	-4,63%	19,98	23,99	20,04%
MLH	3,35	2,34	-3,07%	16,23	16,62	2,39%
MLM	2,75	1,32	-5,99%	14,42	16,00	10,97%

Tabla 5.41: Variaciones de las resistencias mecánicas. Ensayo soluciones salinas.

5.9.5.2. Conclusiones

Se produce un incremento de peso en todos los morteros dosificados, debido a la presencia de las sales cristalizadas de la disolución saturada de sulfato sódico. Este incremento es mayor a medida que los morteros son más ligeros y porosos.

Todas las probetas presentan un buen aspecto, con pequeñas degradaciones que sólo afectan a la textura superficial del material, en el caso de los morteros de diseño con árido reciclado mixto (MLM).

Las resistencias mecánicas presentan resultados desiguales. Si se analiza la resistencia a flexión, solo las probetas de mortero base (MB) aumentan sus valores. En el resto de los casos existen disminuciones no significativas que oscilan entre el 3% y el 6%. La resistencia a compresión se incrementa en todos los morteros por el cierre de los poros producido por las sales cristalizadas, con incrementos del 2,4% al 98%.

5.9.6. Resistencia a la heladicidad

La Instrucción Española del Hormigón Estructural (EHE-08) define la durabilidad de un elemento o estructura como su capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta, y que podrán llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y sollicitaciones consideradas en el análisis estructural. Por lo tanto, es de gran interés conocer el comportamiento de los materiales cementosos frente a acciones que puedan degradar a estos materiales, como en el caso de las heladas.

El agua es uno de los componentes más importantes en la elaboración y curado de los morteros. Lo que al principio es una pasta más o menos líquida mezclada con áridos, acaba convirtiéndose en un material sólido. Sin embargo, aunque el mortero haya endurecido, sigue conteniendo agua en su interior, ya sea en los poros de la propia pasta o en los áridos que la forman. Esta agua, al congelarse, experimenta un aumento de volumen del 9% respecto al inicial.

En función de la cantidad de huecos que el agua ocupa pueden darse dos situaciones: el agua de los poros del mortero solamente los llena de modo parcial cuando se produce la helada (grado de saturación bajo); o bien que el agua ocupa gran parte de los poros (grado de saturación elevado).

En el primer caso existirá espacio suficiente para que el agua al congelarse pueda expandirse, por lo que no se producirán tensiones que puedan dañarlo. En el segundo, el agua no tendrá espacio para expandirse, produciéndose tensiones que pueden dañar al mortero.

Los ciclos de hielo-deshielo se producen cuando un mortero alcanza un grado de saturación tal, que el agua al congelarse no dispone de espacio suficiente para expandirse. Cuanto menor es el tamaño de los poros, mayor es la presión a la que están sometidos, por lo que el fenómeno estudiado se producirá a una menor temperatura de congelación. Esto posibilita que puedan producirse variaciones de la temperatura de congelación en diferentes puntos del mortero, de modo que, al descender la temperatura del agua contenida en los poros de mayor diámetro se hiela antes que el agua situada en los poros más finos, apareciendo una presión hidráulica sobre las paredes de los poros. Posteriormente, la subida de la temperatura descongela el hielo formado, lo que produce una nueva saturación de agua, repitiéndose el ciclo cuando la temperatura vuelve a descender (ACI 2008)⁴⁰⁶.

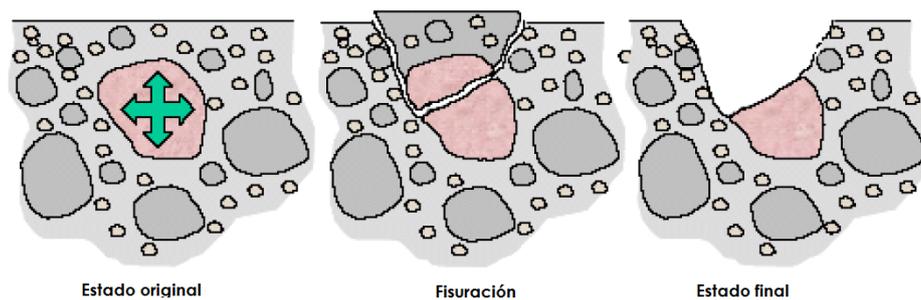


Figura 5.26: Comportamiento de los poros frente a ciclos de hielo-deshielo.

⁴⁰⁶ ACI (2008). "Guía para la Durabilidad del Hormigón." ACI 201.2R-01.

El comportamiento frente a los ciclos de hielo-deshielo evalúa la resistencia de los morteros que van a ser colocados en el exterior, dado que no existe norma UNE-EN para realizar el ensayo de hielo-deshielo, se ha utilizado la Norma UNE-CEN/TS 12390-9 EX (AENOR 2008)⁴⁰⁷.

Se prepararon 4 probetas de (10x10x10) cm³, dos para el ensayo y otras dos como referencia, para cada uno de los cuatro tipos de morteros prescritos.

Transcurridos 27 días desde el amasado, las probetas se pesan y se disponen en unos recipientes metálicos de acero inoxidable de dimensiones (25x40x12) cm³. Estos recipientes se llenan con un líquido formado por una mezcla de agua (97%) y NaCl (3%) hasta cubrir totalmente las probetas con una lámina de líquido de, al menos, 1 cm por encima de la cara superior de la probeta. Pasadas 24 horas, las probetas se pesan de nuevo y se introducen en un arcón congelador con un rango de temperaturas de 0 a -35°C, iniciándose el ciclo del hielo-deshielo.



Figura 5.27: Recipientes acero inoxidable. Pesado probetas. Colocación de sonda en probeta.

El procedimiento descrito para cada uno de los ciclos consta de un periodo de congelación de 16 horas, donde las probetas están dentro de las cajas metálicas sumergidas en el medio de medio de congelación a un temperatura

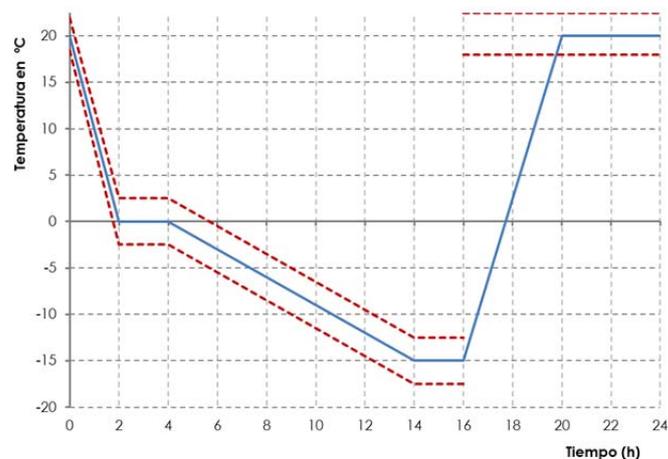
⁴⁰⁷ AENOR (2008). Norma UNE-CEN/TS 12390-9 EX. Norma Experimental. "Ensayos de hormigón endurecido. Resistencia al hielo-deshielo. Pérdida de masa superficial".

entre -13° y -15°C , en el interior del arcón de congelación, y un periodo de descongelación de 8 horas, donde las cajas metálicas con el medio de congelación y las probetas se sumergen en un recipiente de $0,5\text{ m}^3$ con agua a una temperatura de $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$. Esta temperatura se consigue mediante una resistencia eléctrica y el agua se mantiene en movimiento mediante una bomba de circulación.



Figura 5.28: Equipo utilizado durante los ciclos de hielo-deshielo.

Para controlar la temperatura en el interior de la probeta se practica un orificio con un taladro para posicionar un termómetro. La temperatura tiene que estar comprendida entre unos valores determinados por la propia Norma, sin salirse de del área de puntos rojos (Gráfica 5.26)



Gráfica 5.26: Comportamiento de la temperatura en el interior de la probeta s/UNE 12930.

Se han realizado 56 ciclos de hielo-deshielo, que se han prolongado de lunes a viernes de cada semana, dejando los fines de semana y festivos las probetas dentro del arcón a una temperatura de -15°C .

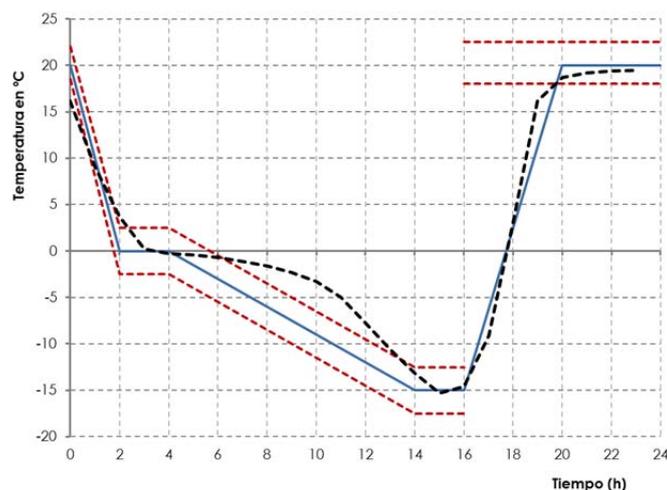
Después de 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49 y 56 ciclos se han inspeccionado visualmente las probetas para determinar si se han producido fisuras o alteraciones significativas en su aspecto. Para determinar la pérdida de masa, las probetas se cepillaron para favorecer el desprendimiento del material, recogiendo las partículas para evitar su pérdida.

También se ha evaluado la variación de las resistencias mecánicas mediante ultrasonidos, después de cada ciclo de hielo y deshielo.

Por último, después de cumplidos los 56 ciclos, se han introducido las probetas ensayadas en la cámara húmeda junto a las probetas de referencia reservadas. Una vez estabilizadas, se han sometido al ensayo de rotura para determinar la variación de sus resistencias a compresión.

5.9.6.1. Resultados

El control de la temperatura del interior de las probetas durante un ciclo de hielo-deshielo se ha efectuado utilizando un termómetro digital. Los resultados se han representado en la Gráfica 5.27.

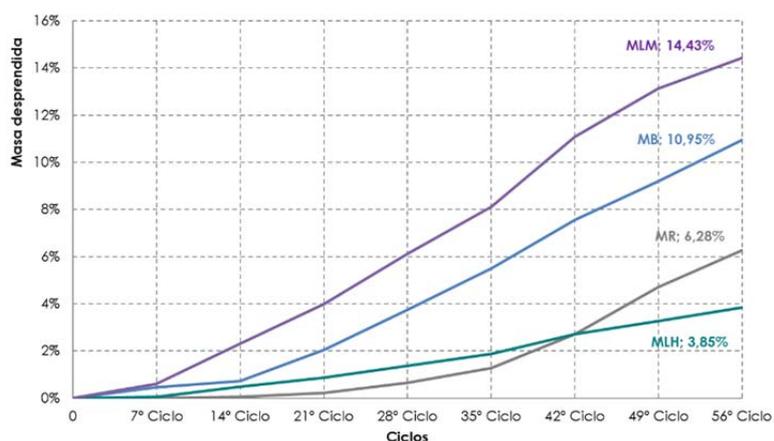


Gráfica 5.27: Comparativo entre temperatura interiores de las probetas s/UNE 12930 y las obtenidas mediante termómetro digital.

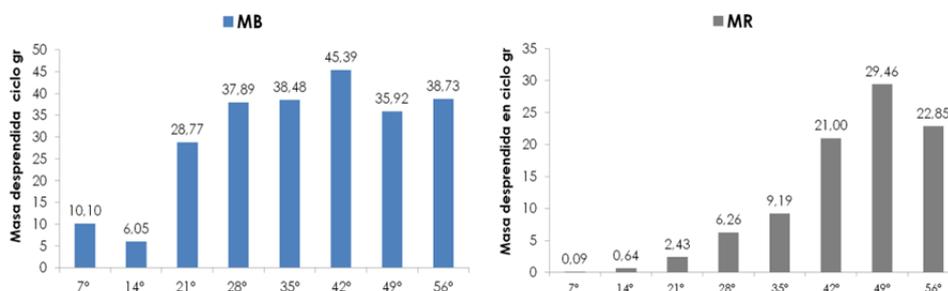
Las pérdidas de masa acumuladas se reflejan en la siguiente Tabla 5.42 y Gráficas 5.28 y 5.29, en las que se recogen los pesos desprendidos acumulados en cada uno de los ciclos:

PESO DESPRENDIDO ACUMULADO EN CADA CICLO (gr)								
Ciclo	7	14	21	28	35	42	49	56
MB	10,10	16,15	44,92	82,81	121,29	166,38	202,60	241,33
MR	0,09	0,73	3,16	9,42	18,61	39,61	69,07	91,92
MLH	0,82	6,37	11,23	17,84	24,56	35,37	42,72	50,10
MLM	7,69	29,03	50,21	77,15	102,46	139,85	165,60	182,09

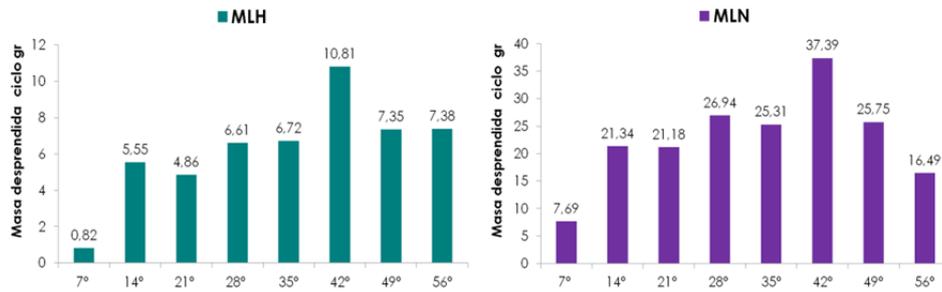
Tabla 5.42: Pesos desprendidos acumulados en los ciclos de hielo-deshielo.



Gráfica 5.28: Porcentajes de masa desprendida en los ciclos de hielo-deshielo.



Gráfica 5.29: Masa desprendida en cada una de las ciclos de hielo-deshielo.



Gráfica 5.30: Masa desprendida en cada uno de los ciclos de hielo-deshielo.

Los resultados de variaciones de las resistencias mecánicas de las probetas sometidas a los ciclos de hielo-deshielo, se muestran en la Tabla 5.43 y en la Gráfica 5.31.

VARIACIÓN RESISTENCIA A COMPRESIÓN (MPa)			
Tipo	Probeta referencia	Probeta ensayada	Variación
MB	44,44	46,14	+3,83%
MR	25,65	26,04	+1,51%
MLH	21,07	19,86	-5,72%
MLM	19,89	17,61	-11,48%

Tabla 5.43: Variación de la resistencia a compresión. Ciclos hielo-deshielo



Gráfica 5.31: Variación resistencia en cada ciclo mediante ultrasonidos.

En cada ciclo realizado se han inspeccionado y documentado los deterioros producidos. Algunas de las probetas se muestran en la Figura 5.34.

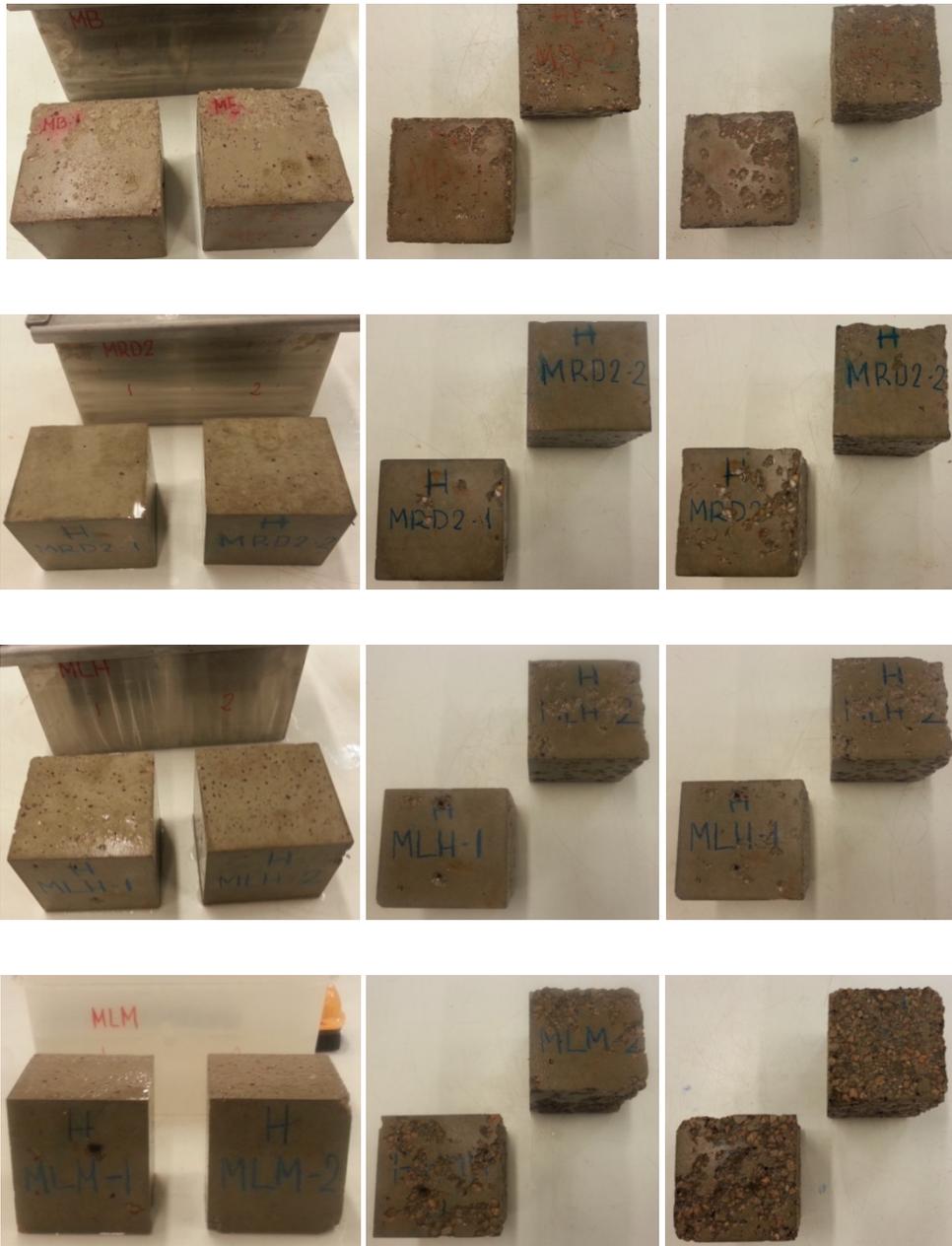


Figura 5.29: Probetas MB, MR, MLH y MLM a los 7, 35 y 56 ciclos de hielo-deshielo.

5.9.6.2. Conclusiones

El análisis de las temperaturas del interior de las probetas durante un ciclo de hielo y deshielo permiten afirmar que, en general, los registros observados se encuentran entre los límites de la Norma UNE 12930, con ligeras variaciones entre la 6ª y 13ª hora del ciclo, que pueden obviarse.

Los morteros base (MB) presentan la pérdida de masa más acusada (241,33 gr), siendo también importante la del mortero de diseño fabricado con árido reciclado mixto (MLM) con 182,09 gr. Por el contrario, el mortero de diseño con árido reciclado de hormigón (MLH) presenta los menores desprendimientos en el material (50,10 gr), seguido del mortero de referencia (MR) (91,92 gr).

Estos resultados permiten afirmar que la porosidad que incorpora la arcilla expandida a los morteros posibilita la expansión del agua al congelarse, evitando la formación de tensiones internas. Otro factor que también ha podido influir en este comportamiento es el tamaño de los poros de la arcilla expandida, los cuales al ser más pequeños se hielan después que los poros grandes, apareciendo las tensiones de expansión más tarde.

Este aspecto se puede observar en las fotografías realizadas de unos cortes practicados sobre las probetas de cada uno de los morteros prescritos.

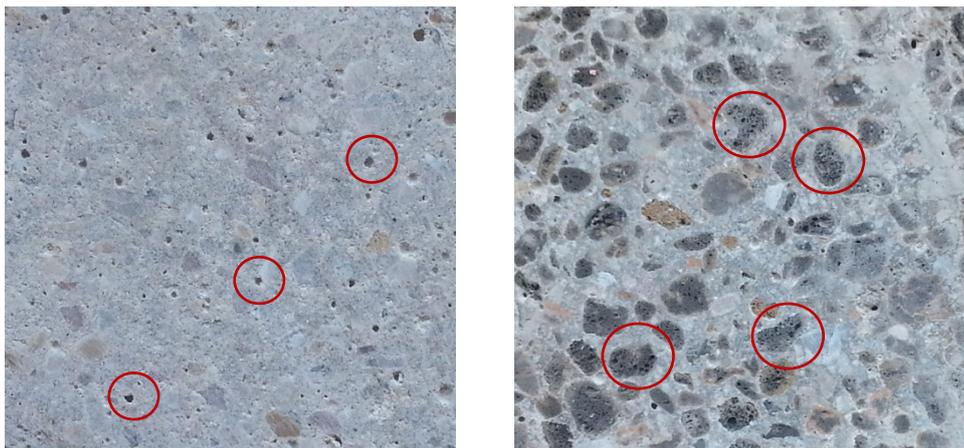


Figura 5.30: Poros del mortero base (izquierda) y mortero de referencia (MR).

Se puede comprobar que en todos los morteros prescritos, los mayores incrementos de pérdida de masa se producen en el ciclo 42, para luego ir

disminuyendo. Es probable que sea debido por el desprendimiento de material en la superficie antes de llegar al interior de la masa donde se encuentra la arcilla expandida, que por su estructura y composición resiste mejor los ciclos de hielo-deshielo.

Una primera inspección visual permite comprobar que las probetas presentan buen estado, sin afecciones significativas, con ligeros desprendimientos en las zonas superficiales, pero sin alteraciones apreciables en su estructura interna. En el caso de los morteros fabricados con arcilla expandida, los desprendimientos de material solo afectan al recubrimiento entre la pasta y los gránulos más superficiales de ésta.

Como conclusión, se puede afirmar que las probetas no presentan alteraciones significativas después de soportar los 56 ciclos de hielo-deshielo.

Los resultados de los ensayos de rotura a compresión de las probetas sometidas al ensayo, en comparación con las probetas de referencia, se observa que los morteros con mayor densidad aumentan muy ligeramente sus prestaciones, siendo los morteros con áridos reciclados los que presentan una disminución en su resistencia mecánica. Estas variaciones no son significativas en ninguno de los morteros prescritos.

Comentario aparte merecen los resultados de las lecturas obtenidas en cada ciclo mediante ultrasonidos, ya que los resultados muestran ciclos donde las resistencias disminuyen y otros en las que presentan incrementos, que algunos casos son bastante significativos. Si se comparan los resultados del ciclo 56 con los obtenidos en la prensa de rotura, se puede observar una importante disfunción entre ellos, por lo que no se consideran como criterio de evaluación y, por lo tanto, son desechados.

De todos los comentarios y valoraciones aportadas anteriormente podemos concluir que los todos los morteros prescritos tienen un comportamiento satisfactorio al ensayo de ciclos de hielo-deshielo, no observándose alteraciones significativas en sus propiedades, tanto desde el punto de vista externo como de su comportamiento mecánico.

5.9.7. Resistencia a la carbonatación

Los procesos de degradación de los materiales y de las estructuras obligan a realizar importantes inversiones, tanto para su reparación como para aplicar tratamientos que neutralicen los mecanismos de degradación que puedan afectarles.

Entre los factores de deterioro de los materiales destacan los procesos de corrosión de las armaduras, que tiene lugar cuando se altera la capa de pasivación formada en la interfase hormigón-acero o mortero-acero. Esta capa pasivante se genera en unas condiciones de alcalinidad determinadas, con pH comprendidos entre 12,5 y 13,5; de manera que cuando se reduce por debajo de estos límites, desaparece el efecto de protección sobre el acero que recubre. Las alteración de la alcalinidad de la capa pasivante se puede producir por la presencia de iones despasivantes, principalmente cloruros, o por procesos de carbonatación, donde la basicidad de las capas protectoras es alterada por los agentes ácidos del entorno, reduciéndose los pH.

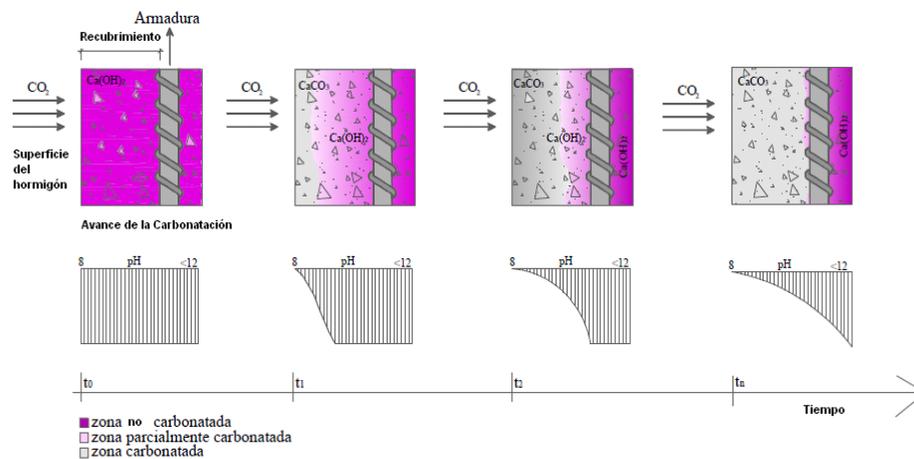


Figura 5.31: Representación del avance del frente de carbonatación y alteración del pH del hormigón en el tiempo. Fuente: Cristiane Pauletti.

La carbonatación de un hormigón o de un mortero se produce al reaccionar el CO₂ atmosférico con el Ca(OH)₂. Este proceso afecta tanto a la fase líquida como a la fase sólida del mortero u hormigón, produciéndose un efecto semejante al de una armadura expuesta a una atmósfera sin protección pasivante.

Los procesos de carbonatación son generalmente muy lentos a causa del bajo contenido en CO₂ de la atmósfera, produciéndose alteraciones muy bajas, del orden de 0,04% en volumen, de forma que los efectos de este fenómeno pueden no aparecer hasta pasados varios años. Por ello, se han diseñado ensayos en los que los materiales se exponen a altas concentraciones de CO₂, simulando situaciones reales con procesos acelerados que permiten predecir su comportamiento a largo plazo.

La carbonatación comienza sobre las superficies externas del mortero u hormigón, propagándose lentamente hacia su interior. La velocidad de la carbonatación es la variación de la profundidad del frente carbonatado con el tiempo en el interior del mortero u hormigón. La carbonatación bajo condiciones atmosféricas normales está condicionada por el contenido en cemento de la mezcla, por la porosidad y por el grado de saturación de agua en el interior de los poros (Moreno 1999)⁴⁰⁸.

La velocidad de carbonatación aumenta cuando la humedad relativa se encuentra entre el 50 y el 55%. Para valores inferiores al 50% no hay suficiente agua en los poros para que se disuelvan cantidades significativas de hidróxido cálcico y con valores superiores al 75% los poros se bloquean progresivamente por la presencia de agua.

La velocidad de penetración disminuye con el paso del tiempo, debido a que el estrato carbonatado protege al resto del mortero u hormigón del contacto con el exterior.

Las técnicas para caracterizar la carbonatación son variadas, desde el análisis térmico gravimétrico (TGA), difracción de rayos X (XRD), la difracción de neutrones (ND), la microscopía electrónica de barrido (SEM), la porosimetría de intrusión de mercurio (MIP), el análisis de reacción nuclear resonante (NRRRA), y el indicador de pH disolución de fenolftaleína.

⁴⁰⁸ Moreno, E. I. (1999). Carbonation of blended cement concretes, University of South Florida.

En esta investigación se ha utilizado el método de análisis del indicador de pH fenolftaleína, que permite diferenciar tres zonas de pH mediante el color.

Para valores de PH inferiores a 8 la disolución se vuelve incolora, entre 8 y 9,5 adquiere una tonalidad rosa suave y para valores superiores a 9,5 adquiere un color púrpura intenso.

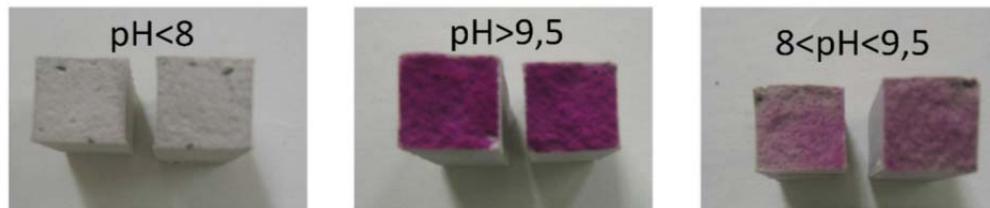


Figura 5.32: Tonalidades de la fenolftaleína.

Para producir el proceso de carbonatación acelerada se ha utilizado una cámara estanca sellada, en la que se introduce CO_2 mediante un regulador de caudal y un sistema de purga de aire. El CO_2 se obtiene de una botella industrial de 20 kg. Las mediciones de humedad y temperatura se realizaron mediante termómetro-higrómetro digital.

Para la realización del ensayo se fabricaron 5 probetas normalizadas de la misma amasada de $(40 \times 40 \times 160)$ mm³. De éstas, dos se utilizaron para realizar el ensayo y las otras tres se reservaron como referencias para cada uno de los morteros prescritos.

Transcurridos 28 días de curado en cámara, las probetas se secaron en una estufa hasta peso constante a una temperatura de $(65 \pm 5)^\circ\text{C}$. Posteriormente se introdujeron en una cámara, posicionando las probetas mediante separadores de PVC para evitar el contacto de su cara inferior con el suelo de la cámara.

En esta situación, se incorporan 30 litros de CO_2 contenidos en una botella industrial de 20 kg, midiendo el caudal mediante reloj, completando el 20% del volumen total de la cámara (140 litros). Mediante una sonda se comprueba que la concentración de CO_2 en el interior de la cámara supera el 5%.



Figura 5.33: Equipos utilizados ensayo de carbonatación. Cámara estanca, botella CO₂ y reloj de medición del caudal de CO₂.

Las probetas permanecieron en el interior de la cámara durante dos meses, renovando cada semana la atmósfera interior retirando el gas mediante una purga y añadiendo un volumen adicional de CO₂.

Finalizado el tiempo de exposición de dos meses se comprueba el efecto del CO₂ sobre el mortero mediante la valoración de los siguientes parámetros: variación del peso inicial de la probeta, observación organoléptica de las alteraciones superficiales, variaciones de las resistencias mecánicas y, por último, la medida de la profundidad de la carbonatación.

La medición de la profundidad media de la carbonatación producida se ha realizado aplicando sobre las probetas una impregnación de fenolftaleína al 1%. Para ello, se seccionan las probetas aplicando una carga sobre la parte central de la probeta, apoyando ésta dos puntos extremos separados entre sí ($100 \pm 0,5$) mm, para conseguir una superficie lo más plana y regular posible.

Rota la probeta se retira el polvo residual de la misma y se pulveriza sobre esta, la disolución de fenolftaleína. Las áreas carbonatadas del mortero no cambiarán de color, mientras que las áreas con un pH mayor de 9 adquirirán un color rosáceo.

5.9.7.1. Resultados

Las variaciones de peso de las probetas de los morteros prescritos que fueron sometidos a dos meses de carbonatación acelerada se muestran en la Tabla 5.44.

VARIACIÓN DEL PESO (gr)					
Tipo	Antes	Media	Después	Media	Variación
MB	528,50	538,10	550,70	549,95	2,20%
	537,70		549,20		
MR	344,70	346,75	356,70	359,15	3,58%
	348,80		361,60		
MLH	279,90	278,80	294,10	293,05	5,11%
	277,70		292,00		
MLM	290,45	292,23	304,60	307,65	4,92%
	296,00		310,70		

Tabla 5. 44: Evolución de peso de los morteros sometidos a la carbonación acelerada.

Una vez pesadas las probetas, se inspeccionaron para comprobar si habían sido afectadas por el proceso de carbonatación acelerada. La Tabla 5.45 recoge los resultados del ensayo organoléptico.

COMPROBACIÓN ORGANOLÉPTICA				
Tipo	Pérdidas materia	Aristas romas	Fisuras	Aspecto general
MB	No	No	No	Bueno
MR	No	No	No	Bueno
MLH	No	No	No	Bueno
MLM	No	No	No	Bueno

Tabla 5.45: Comprobación organoléptica morteros sometidos a carbonatación acelerada.

Para determinar la profundidad del frente de carbonatación producido al aplicar la disolución de la fenolftaleína se fotografían digitalmente, con proyección ortogonal sobre la superficie de rotura de las probetas. Las instantáneas se procesan en un programa de dibujo asistido, donde se escalan y se dibuja el frente de carbonatación. Se calcula el área exterior de la probeta y el área del frente de carbonatación.

La profundidad media del frente de carbonatación se determina mediante la raíz cuadrada de la diferencia entre el área carbonatada y la no carbonatada, aplicando las siguientes expresiones:

$$\text{Lado cuadrado equivalente} = \sqrt{\text{Área}} \quad \text{Profundidad media} = L_{ext} - L_{Int}$$

Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 5.46 y en la Figura 5.34 se pueden observar los frentes de carbonatación obtenidos.

PROFUNDIDAD DEL FRENTE DE CARBONATACIÓN					
Tipo	Área ext. (mm ²)	Media	Área int. (mm ²)	Media	Profundidad (mm)
MB	1.610	1.601	1.512	1.490	1,41
	1.599		1.471		
	1.597		1.481		
	1.599		1.496		
MR	1.599	1.599	1.520	1.480	1,52
	1.599		1.489		
	1.599		1.443		
	1.599		1.468		
MLH	1.599	1.599	1.517	1.509	1,14
	1.599		1.524		
	1.600		1.492		
	1.599		1.503		
MLM	1.599	1.599	1.455	1.497	1,30
	1.599		1.512		
	1.599		1.515		
	1.599		1.508		

Tabla 5.46: Profundidad medida de la carbonatación.

Una vez concluido el ensayo, las probetas introdujeron en una cámara húmeda para igualar su humedad con la de las probetas patrón. Transcurridos 7 días se rompieron, registrando las variaciones producidas entre las probetas ensayadas y las probetas de referencia. En la Tabla 5.47 se muestran los resultados obtenidos.

RESISTENCIAS MECÁNICAS						
Tipo	Resistencia a flexión (MPa)			Resistencia a compresión (MPa)		
	Referencia	Ensayo	Variac. %	Referencia	Ensayo	Variac. %
MB	8,77	7,99	-8,90%	42,87	37,32	-12,95%
MR	6,00	4,56	-24,00%	18,75	20,94	11,68%
MLH	3,66	2,68	-26,77%	16,63	13,96	-16,05%
MLM	4,11	3,09	-24,82%	21,85	13,27	-39,26%

Tabla 5.47: Variaciones resistencias mecánicas ensayo de carbonatación acelerada.

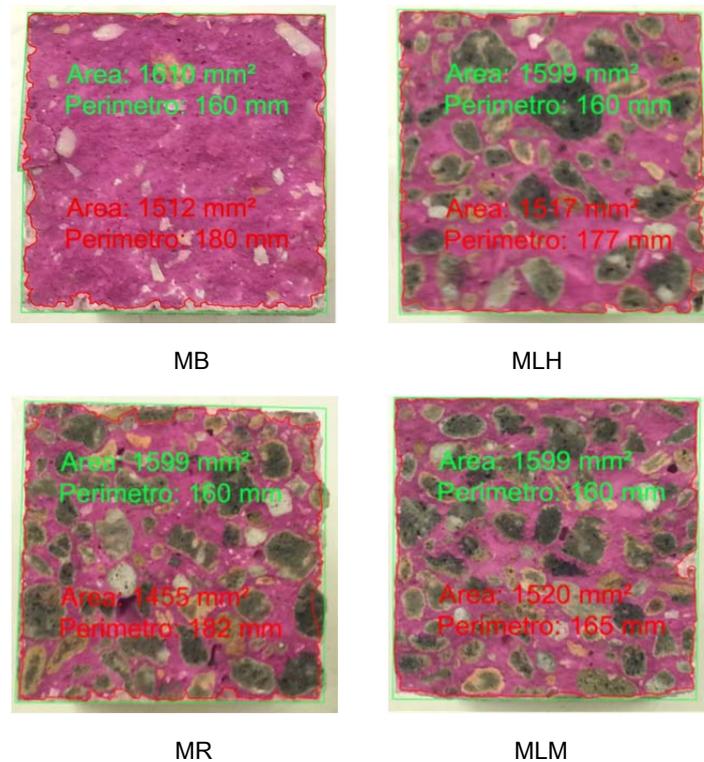


Figura 5.34: Penetración del frente de carbonatación de los morteros prescritos.

5.9.7.2. Conclusiones

Todas las probetas experimentaron incrementos de peso moderados, correspondiendo los mayores registros a los morteros más porosos, ya que éstos facilitan la difusión del dióxido de carbono en el interior del material. Diversos estudios corroboran este comportamiento (Gaspar Tebar and Muñoz Plaz 1991)⁴⁰⁹.

Mediante la inspección organoléptica de las probetas de los morteros prescritos se comprueba que ninguna de ellas ha resultado afectada por la acción del CO₂, ni tampoco se observan alteraciones superficiales reseñables.

⁴⁰⁹ Gaspar Tebar, D. and M. Muñoz Plaza (1991). "Accion del CO2 sobre un cemento portland: influencia sobre las características química y fisicomecánicas." *Materiales de Construcción* 611: 37-53

La profundidad del frente de carbonatación aumenta con una mayor relación agua-cemento (Ocampo, Vuanello et al. 2010)⁴¹⁰, circunstancia que, salvo en los morteros de diseño, se produce en los morteros ensayados. Es probable que este comportamiento sea debido a que las líneas granulométricas son más continuas en los morteros de diseño que la utilizada en los morteros de referencia.

No obstante, el frente carbonatado registra valores muy pequeños, que nunca influirían en el deterioro de las estructuras armadas, puesto que éstas presentan siempre recubrimientos muy superiores (>25 mm).

Las resistencias mecánicas obtenidas en los ensayos mostraron resultados con un comportamiento contrario a los encontrados en la bibliografía consultada, donde las resistencias mecánicas aumentan con la carbonatación (Meyers 1949; Hornain 1976)^{411 412}. Por el contrario, excepto el mortero de referencia (MR), el resto de morteros prescritos registran pérdidas de resistencia, siendo mayores en los morteros de diseño con áridos reciclados mixtos (MLM). En el caso del mortero base (MB) y de los morteros de diseño con áridos reciclados de hormigón (MLH), los valores obtenidos son muy similares.

⁴¹⁰ Ocampo, I., O. Vuanello, et al. (2010). "Estudio de la carbonatación acelerada en probetas de hormigón armado". VI Congreso Internacional sobre patología y recuperación de estructuras. C. 2010. Córdoba-Argentina.

⁴¹¹ Meyers, S. L. (1949). Rock Products: 96-98.

⁴¹² Hornain, H. (1976). Carbonatación del Concreto. RILEM. Wexham-Springs. Inglaterra.

CAP. VI PUESTA EN OBRA

Capítulo 6: PUESTA EN OBRA

6.1. INTRODUCCIÓN

Como complemento a la investigación realizada se diseña una prueba industrial que permita utilizar los materiales ensayados y conocer su comportamiento en una situación real de prestación y determinar su viabilidad comercial. La unidad de obra elegida es un forjado de madera, donde los morteros formarán parte del relleno de la capa de compresión.

Esta aplicación se justifica por la importancia que en la actualidad tiene la rehabilitación de edificios antiguos con protecciones integrales o estructurales, precisando su recuperación.

Los viejos forjados de madera casi siempre requieren de intervenciones de refuerzo, ya que fueron diseñados para soportar cargas pequeñas y suelen presentar también una deformabilidad excesiva respecto a las exigencias estructurales actuales.

Tradicionalmente se han venido aplicando diferentes soluciones constructivas para resolver estas situaciones. Una de ellas, es la colocación de una solera de hormigón ligeramente armado sobre el forjado existente, previamente saneado, sin ningún tipo de conexión entre ambos. Esto hace que las dos partes del forjado así constituido trabajen de forma independiente, con lo que la capacidad portante y la rigidez no se ven incrementadas. La ventaja de esta solución es que permite la redistribución de cargas entre las viguetas, pero aumentando el peso propio, que algunos casos puede superar la eficacia del refuerzo. También se suelen instalar conectores entre las viguetas y la solera de hormigón o mortero para asegurar el trabajo conjunto.

En la prueba industrial realizada se ha optado por esta última solución, disponiendo conectores entre la vigueta de madera y el relleno de mortero para que ambos trabajen de forma conjunta como una pieza mixta de mortero-hormigón y madera.

El objetivo del proceso es conseguir que el mortero de relleno trabaje a compresión, con lo que se consigue aumentar el canto resistente del forjado y la resistencia mecánica del conjunto. Para ello, los conectores deberán absorber los esfuerzos rasantes que se generan en la superficie de contacto entre ambos materiales.

La solución mixta del conjunto madera-hormigón presenta ventajas frente a soluciones exclusivas de madera u hormigón por separado.



Figura 6.1: Forjado mixtos madera-hormigón.

El conjunto final madera-mortero o madera-hormigón es más ligero que en el caso de una estructura de hormigón y permite dejar vista la estructura, mejorando su comportamiento acústico frente a la solución sólo con madera, consiguiendo un efecto de diafragma de gran rigidez y eficacia.

El punto crítico de estos sistemas se encuentra en la conexión entre la madera y el hormigón, por lo que, para garantizar el comportamiento mecánico del conjunto, es necesario asegurar una perfecta integración entre ambos materiales.

6.2. MONTAJE DE LOS FORJADOS

Para el montaje de los forjados se ha contado la colaboración de la comercial Arte y Madera de Burgos S.A. Esta empresa ha suministrado las vigas y los tableros de madera y los conectores utilizados en la prueba industrial.

Las probetas industriales utilizadas están formadas por los siguientes elementos:

- Una vigueta de madera laminada de abeto GL24c de (100x160) mm² de sección y 1500 mm de longitud.
- Un tablero aglomerado de dimensiones (500x1500) mm² y de 15 mm de espesor.
- Doce tirafondos de cabeza redonda plana, bicromados y autorroscantes, de diámetro 8 mm y longitud 200 mm.



Figura 6.2: Vigueta de madera laminada, tablero aglomerado y conectores.

El proceso de montaje comienza replanteando la posición de los conectores con el tablero desmontado. Posteriormente se fija el tablero a la vigueta de madera mediante tres tornillos de 50 mm de longitud, que permiten inmovilizarlo hasta la colocación de los conectores.

Se colocan seis parejas de conectores (12 tornillos en total), separando las parejas de conectores de los extremos 10 cm del borde del tablero y los centrales posicionados a 26 cm. Los conectores se roscan utilizando un taladro eléctrico, con una inclinación próxima a los 45° y dejándolos a una altura aproximada de unos 50 mm. Para facilitar la colocación de los conectores se les pone una marca de referencia para ajustar la profundidad referida.

Finalizada la distribución de los conectores se colocan las tabicas perimetrales, que hacen las funciones de encofrado perimetral. Éstas se han fabricado con tablero de madera contrachapada de tres capas, para poderlo reutilizar en todos los moldes, y se cortan a la altura de la capa de mortero para facilitar nivelación y enrasado.

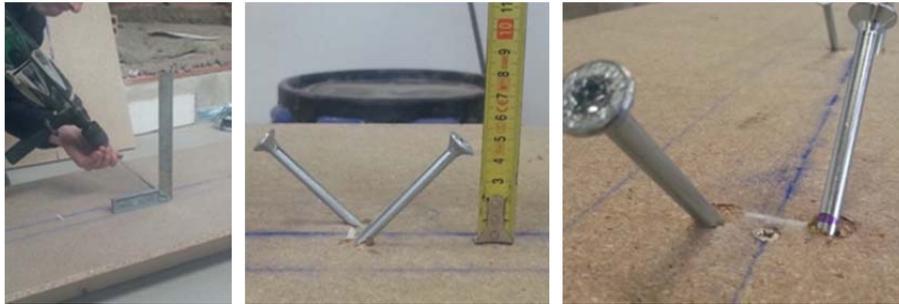


Figura 6.3: Colocación de los conectores.

Por encima de los conectores se coloca una malla electrosoldada de diámetro 5 mm y de luz de malla (200x300) mm², posicionándola mediante la ayuda de unos separadores de mortero, con el objeto de garantizar un recubrimiento superior a 25 mm.



Figura 6.4: Probeta del forjado.

6.3. AMASADO Y PUESTA EN OBRA

La mayoría de los trabajos realizados con morteros reciclados se han desarrollado sobre probetas de laboratorio. En este apartado de la Tesis se quieren extrapolar los resultados obtenidos a elementos a escala real, para evaluar las posibles diferencias entre el amasado del mortero en las condiciones del laboratorio y el realizado en la prueba industrial.

Para la elaboración de los morteros se ha empleado una hormigonera de 70 litros de capacidad. Las cantidades de cada material se han pesado por separado mediante balanza de precisión.



Figura 6. 5: Amasador empleada en la fabricación de los morteros.

Antes de introducir los materiales en la amasadora, el tambor se humedece para evitar la pérdida del agua de amasado por adhesión de ésta en las paredes internas del mismo.

Las cantidades de cada uno de los componentes han sido obtenidas con las dosificaciones prescritas en la fase experimental de esta Tesis y se recogen en la Tabla 6.1.

De cada amasada se ha comprobado la consistencia (Tabla 6.2) y se han moldeado dos series de probetas para determinar sus resistencias mecánicas.

DOSIFICACIONES MORTERO (Kg)							
Tipo	Cemento	Arena	ARH	ARM	Agua	2-4	3-8F
MB	26,00	104,00	-	-	17,14	-	-
MLH	56,55	-	49,31	-	34,89	47,16	10,60
MLM	25,00	-	-	18,90	20,55	20,87	4,68

Tabla 6.1: Dosificaciones morteros de la puesta en obra.

CONSISTENCIAS		
Tipo	Relación agua/ cemento	Consistencia (mm)
MB	0,659	180,50
MLH	0,617	175,50
MLM	0,822	176,00

Tabla 6.2: Valores de las consistencias de los morteros en la puesta en obra.

Para el amasado de los morteros utilizados en la prueba industrial se han seguido los siguientes pasos:

- En primer lugar, se pesan los áridos, natural o reciclado en función del tipo de mortero que se vaya a preparar, y se introducen en la hormigonera.
- Posteriormente, se vierte el 50% del agua y se realiza un amasado de dos minutos, consiguiendo así una mezcla homogénea.
- Por último, se añade el cemento y el 50% de agua restante, amasando de nuevo durante otros dos minutos más.

Terminado el amasado, se vierte el mortero sobre una carretilla, previamente humedecida, y desde ésta al encofrado mediante palas metálicas y paletas.

Primero se vierte parte del material hasta alcanzar la mitad del espesor del forjado, es decir, unos 4 cm y se compacta mediante vibrador de aguja. Posteriormente, se vierte el resto del mortero y se vuelve a compactar, retirando con la regla el material sobrante. Por último, se uniformiza la superficie y se nivela mediante raseo con llana y regla metálica.



Figura 6.6: Proceso de amasado y vertido en el molde del forjado.

Para evitar la evaporación del agua de amasado, se cubre la pieza hormigonada con un plástico durante 7 días y se realiza un curado del mortero difuminando agua suavemente por la superficie, tapando de nuevo con el plástico. Transcurridos los 7 días se retira el plástico y se deja la probeta en el laboratorio a temperatura ambiente.

Transcurridas 4 horas después de preparar la probeta del forjado realizada con mortero base (MB), se observa la aparición de una fisura superficial en el centro de la probeta y hacia uno de los bordes. Por el tiempo transcurrido desde su llenado, puede deberse a procesos de retracción hidráulica por la contracción en el fraguado, muy habituales en soleras de poco espesor.

Para conocer su evolución durante el proceso de curado, se hace un seguimiento marcando sus extremos y el punto medio del segmento que forman mediante un pie de rey. También se controla la anchura de la fisura mediante un fisurómetro.



Figura 6.7: Fisura y medición de la evolución de la misma.

Las mediciones de control y seguimiento de la evolución de la fisura se recogen en la Tabla 6.3.

Con las mediciones realizadas podemos afirmar que se trata de una fisura de retracción, que prácticamente se estabilizó el mismo día de su aparición. Las diferencias de las longitudes estimadas se justifican porque cuando se realizó la primera medición la fisura se apreciaba muy débilmente, por lo que no se registró su medida inicial hasta conocer su evolución.

VARIACIONES DIMENSIONALES DE LA FISURA				
	Largo	Ancho ext. dcho.	Ancho centro	Ancho ext. Izq.
1 día	93 mm	0,1 mm	1,4 mm	0,1 mm
2 día	93 mm	0,1 mm	1,4 mm	0,1 mm
3 día	93 mm	0,1 mm	1,4 mm	0,1 mm
7 día	109 mm	0,1 mm	1,8 mm	0,1 mm
14 día	109 mm	0,1 mm	1,8 mm	0,1 mm
21 días	109 mm	0,1 mm	1,8 mm	0,1 mm
28 días	109 mm	0,1 mm	1,8 mm	0,1 mm
35 días	109 mm	0,1 mm	1,8 mm	0,1 mm

Tabla 6.3: Mediciones fisura sobre probeta forjado rellena con mortero base.

6.4. ROTURA DE LAS PROBETAS

Transcurridos 28 días las probetas se ensayaron en la prensa del Laboratorio de Grandes Infraestructuras de la Escuela Politécnica Superior.

Se ensayaron las probetas realizadas con los morteros diseñados en los trabajos previos de investigación de la prueba industrial y también una viga de madera, con el objetivo de determinar la influencia la sección mixta y de la calidad del mortero, sobre la resistencia mecánica del conjunto.

La prensa se compone de una unidad hidráulica de 100 Tn de capacidad portante conectada a una unidad de medida electrónica de 5 canales, con la posibilidad de incorporar los datos generados por el software en una hoja de cálculo.

La prensa dispone de un actuador de la marca MTS modelo 201.70 HF, con las siguientes características: fuerza de tensión 965 KN y fuerza de compresión de 1.460 KN. El transductor es de la marca MTS modelo 661.31F-01 con una capacidad del 1000 KN.



Figura 6.8: Prensa de 1000 KN. Detalle del actuador y del transductor.

La prensa permite aplicar tanto una carga continua como una carga variable para conseguir un desplazamiento del transductor uniforme. Se opta por aplicar una carga variable con una velocidad de descenso de 0,01 mm/seg.

El programa de gestión de los datos es de la marca MTS Flex Test GT, cuya función principal es proporcionar los valores de accionamiento del transductor que ejerce la fuerza sobre un pistón hidráulico, registrando también los valores de fuerza y del desplazamiento.

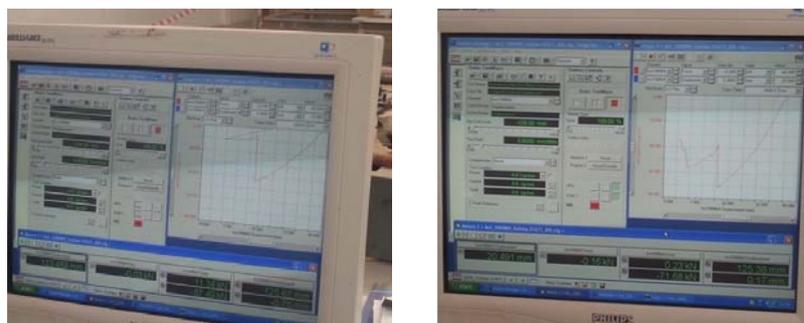


Figura 6.9: Software empleado para el desarrollo del ensayo de rotura probetas por flexión.

El ensayo de rotura por flexión de la probeta de forjado y de la viga de madera en la prueba industrial se realiza según el esquema siguiente:

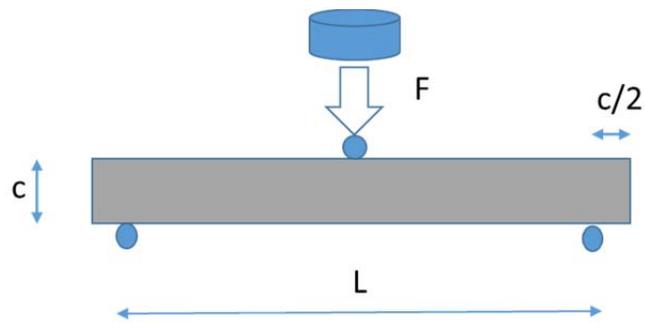


Figura 6.10: Esquema del ensayo de rotura por flexión.

Siendo:

F Fuerza aplicada con el transductor.

C Canto viga.

L Longitud viga.

Mediante puente grúa se sitúa la probeta sobre unos soportes, debajo del marco de carga. Previamente se replantea en el suelo la posición de los apoyos inferiores, para que éstos se sitúen a la distancia marcada en el esquema del ensayo y el transductor en la parte central (Figura 6.11).



Figura 6.11: Replanteo y posicionamiento de los soportes.



Figura 6.12: Posicionamiento de las probetas sobre la prensa.

Antes de su rotura, las probetas de forjado se sujetaron con eslingas sobre un puente grúa y se pesaron con una báscula de precisión. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 6.4.

PESO PROBETAS (Kg)					
Tipo	Tablero	Conectores	Viga	Mortero	Total
MB	7,35	0,52	10,46	127,17	145,50
MLH	7,55	0,52	10,99	70,94	90,00
MLM	7,43	0,52	10,75	63,80	82,50

Tabla 6.4: Peso probetas ensayadas.



Figura 6.13: Pesado de las probetas mediante puente grúa.

6.5. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Los registros obtenidos en los cuatro ensayos realizados a las tres probetas de los forjados y a la viga de madera laminada, se refieren a la carga máxima y el desplazamiento.

Como ensayo de control también se rompieron las probetas testigos reservadas de cada uno de los morteros. Se adjunta documentación gráfica de la probeta durante el ensayo para apreciar su rotura y se complementa con el gráfico fuerza-desplazamiento.

Las escalas horizontal y vertical de las gráficas fuerza-desplazamiento se han unificado para todas las probetas para que los gráficos se puedan comparar.

También se ha calculado de forma teórica la carga máxima de servicio y la carga de rotura de cada una de las tres probetas de forjado, para compararlas con las cargas obtenidas durante el ensayo.

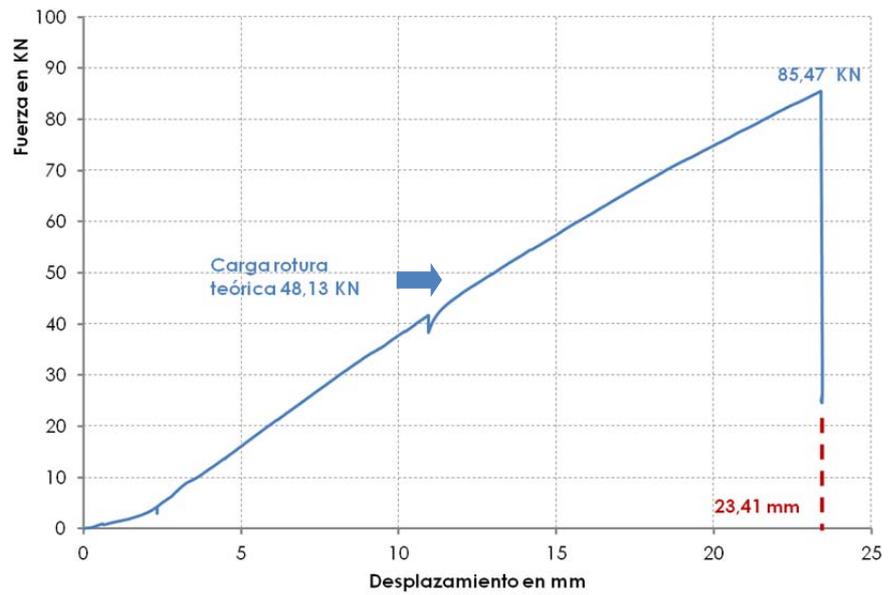
En la Tabla 6.5, en las Figuras 6.14, 6.15, 6.16, 6.17 y en las Gráficas 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 y 6.5 se muestran los resultados obtenidos y una panorámica de las fases de los ensayos realizados.

ENSAYO DE FLEXIÓN				
Tipo	Carga máxima (Kn)	Flecha (mm)	Probeta testigos compr. 28 (N/mm ²)	Probeta testigos tracc. 28 (N/mm ²)
Probeta MB	85,47	23,41	39,90	8,39
Probeta MLH	87,49	25,00	15,59	3,56
Probeta MLM	71,68	24,43	13,14	3,73
Probeta viga	49,91	34,06	-	-

Tabla 6.5: Carga última y desplazamiento en el ensayo de flexión.



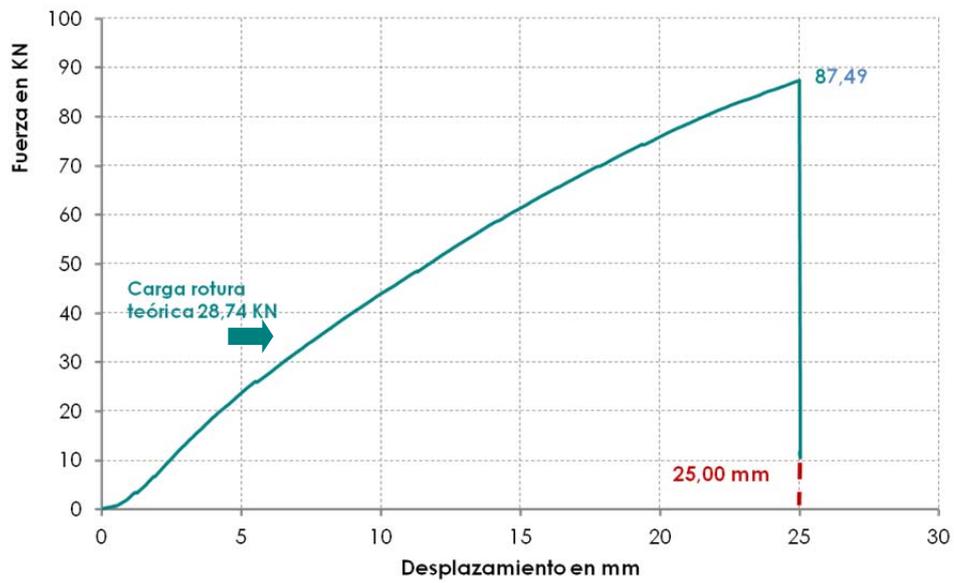
Figura 6.14: Fases ensayo rotura a flexión mortero base.



Gráfica 6.1: Gráfica desplazamiento-fuerza del mortero base.



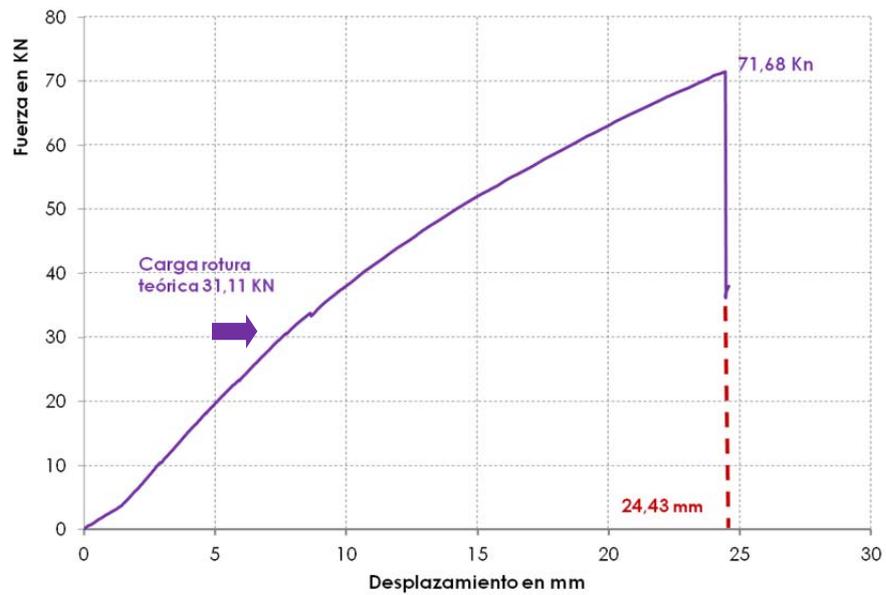
Figura 6.15: Fases ensayo rotura a flexión mortero MLH.



Gráfica 6.2: Gráfica desplazamiento-fuerza del mortero MLH.



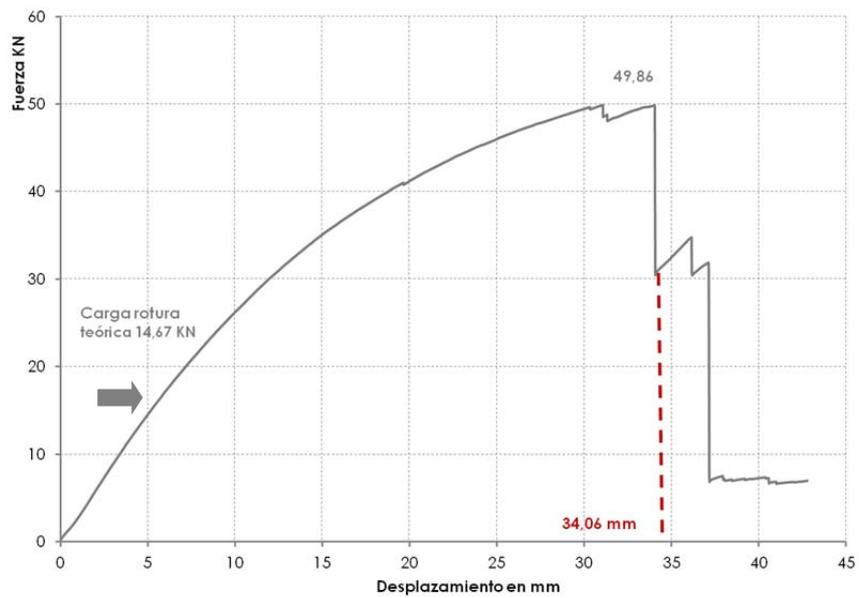
Figura 6.16: Fases ensayo rotura a flexión mortero MLM.



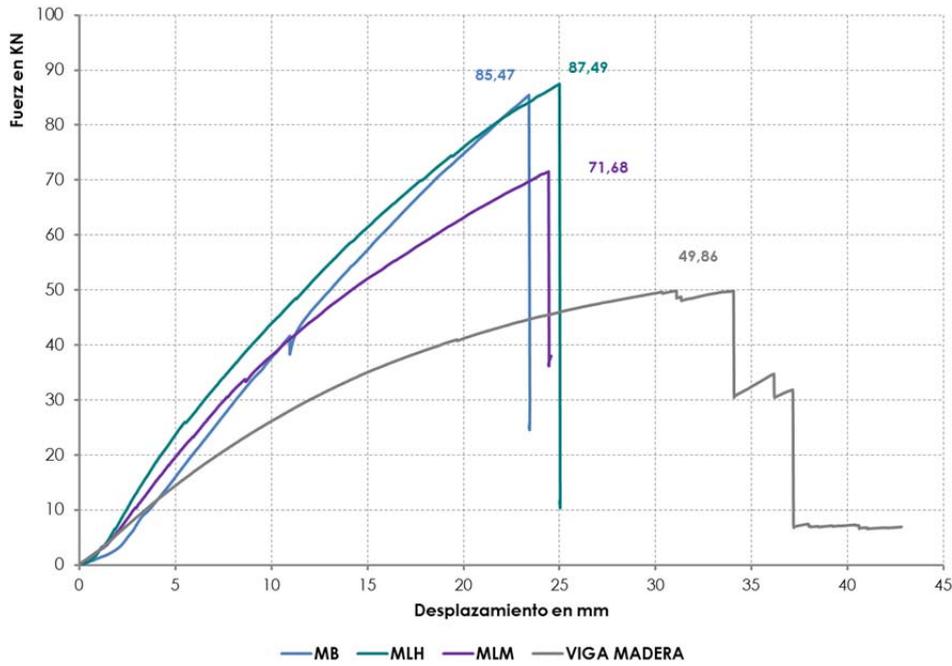
Gráfica 6.3: Gráfica desplazamiento-fuerza del mortero MLM.



Figura 6.17: Fases ensayo rotura a flexión viga laminada GL24c.



Gráfica 6.4: Gráfica desplazamiento-fuerza de la viga de madera laminada.



Gráfica 6.5: Gráfica desplazamiento-fuerza en todas las probetas ensayadas.

Al mismo tiempo, se ha calculado de forma teórica la carga máxima de rotura, de cada una de las tres probetas de forjado y la de la viga de madera laminada, para determinar el Coeficiente de Reserva de Seguridad existente en cada uno de los casos, los resultados se recogen en la Tabla 6.6.

COMPARATIVO CARGAS TEÓRICAS Y DE ROTURA			
Tipo	Carga rotura en ensayo (KN)	Carga rotura teórica calculada (KN)	Coefficiente reserva de seguridad
Probeta MB	85,47	48,13	1,78
Probeta MLH	87,49	28,74	3,04
Probeta MLM	71,68	31,11	2,30
Probeta viga	49,91	14,67	3,40

Tabla 6.6: Comparativo entre las cargas teóricas y las cargas de rotura.

También se han determinado las cargas de rotura en la fibra superior (mortero) y en la fibra inferior (madera).

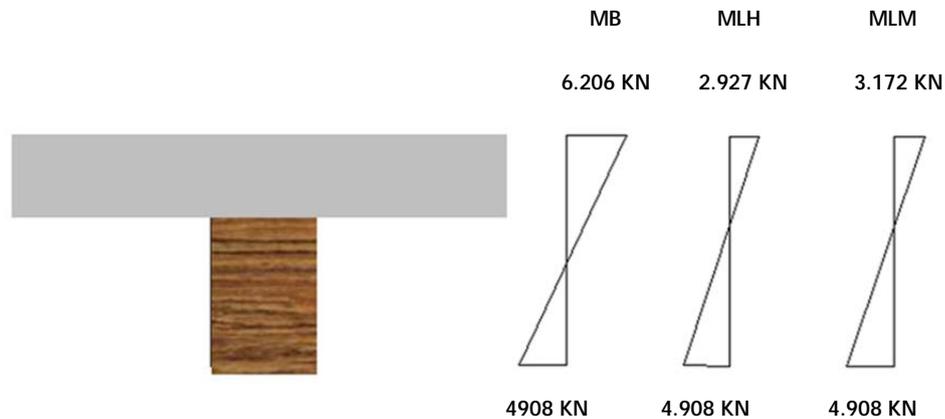


Figura 6.18: Cargas de rotura en la fibra superior e inferior.

6.6. CONCLUSIONES

La solución mixta diseñada permite alcanzar incrementos considerables de las características mecánicas, con valores comprendidos entre el 144% al 175%. Estos incrementos no están vinculados con la resistencia a compresión del mortero utilizado, pues apenas existen diferencias entre las cargas de rotura, con valores entre 85,47 KN y 71,68 KN, mientras que son notables las diferencias en las resistencias mecánicas. Así, si se analiza el comportamiento mecánico del mortero base (MB), se observa que en la rotura de las probetas testigos se obtuvo una resistencia de rotura a compresión de 39,90 N/mm², mientras que el mortero de diseño realizado con árido reciclado mixto (MLM) solo se alcanzaron 13,14 N/mm². Por ello, se puede afirmar que el mortero de relleno no condiciona sustancialmente la carga final a la que rompe el forjado.

Otra referencia a tener en cuenta es la importante disminución del peso propio de la unidad de forjado cuando se utilizan los morteros de diseño, con reducciones del 39% en el peso del forjado, pero manteniendo las mismas prestaciones mecánicas. Esto resulta una ventaja competitiva frente a las estructuras fabricadas con materiales tradicionales y puede servir como

solución constructiva óptima en las obras de rehabilitación, cuando se quieren obtener forjados resistentes con gran capacidad de carga, pero con un disminución considerable del peso propio, lo que determina estructuras más ligeras, muy aconsejables en este tipo de intervenciones.

De la inspección de la rotura de las probetas de los forjados también se puede concluir que la conexión mecánica entre la madera y los morteros ha funcionado satisfactoriamente, siendo lo suficientemente rígida como para garantizar la unión sólida entre materiales con distinta respuesta mecánica frente a las acciones de carga.

CAP. VII ESTUDIO ECONOMICO

Capítulo 7: ESTUDIO ECONÓMICO

7.1. INTRODUCCIÓN

Determinada la aptitud de los morteros prescritos para formar parte de forjados diseñados, se procede a evaluar su viabilidad de utilización mediante un estudio económico que contemple una valoración tanto cuantitativa como cualitativa del producto, así como las ventajas competitivas en el ámbito de la sostenibilidad, por la utilización de áridos reciclados en la composición de los morteros diseñados. El estudio económico se ha realizado sobre los cuatro morteros prescritos utilizados en las investigaciones.

El precio final del mortero depende de varios factores: el coste de la materia prima, el coste de la fabricación y el coste de la puesta en obra.

Para la realización del estudio económico solo se ha tenido en cuenta el coste de los materiales y el proceso de fabricación, ya que el coste de la puesta en obra varía en función de la unidad constructiva ejecutada, por lo que son múltiples las variables que deben considerarse para su determinación.

Los costes de construcción se componen de costes directos y los costes indirectos.

Los costes directos son aquellos que valoran las unidades constructivas de una partida de obra y se obtienen por la suma de los costes de todos sus componentes: mano de obra, materiales, maquinaria, y gastos auxiliares.

Los gastos auxiliares comprenden las inversiones en maquinaria y equipos precisos para la realización de la unidad de obra, como pueden ser los andamios, plataformas, montacargas o pequeñas herramientas necesarias para hacer la unidad de obra como las máquinas perforadoras, reglas, etc. También se consideran en este epígrafe la retirada de escombros producidos por la realización de la unidad de obra o el traslado del material dentro de la obra. La estimación de estos gastos se suele realizar aplicando un porcentaje (%) sobre el total de la mano de obra utilizada.

Los costes indirectos son aquellos que no pueden imputarse a una unidad de obra concreta, sino al conjunto o parte de una obra. Según el Reglamento General de Contratación del Estado, publicado en el BOE 257 de 26 de Octubre de 2001, en su artículo 130 punto 3, pueden considerarse como gastos indirectos los siguientes: gastos de instalación de oficinas a pie de obra, comunicaciones, almacenes, vestuarios y aseos de obra, personal técnico y administrativo adscrito exclusivamente a la obra y los imprevistos. Estos se obtienen aplicando un porcentaje (%) a los costes directos, igual para todas las unidades de obra.

La nomenclatura utilizada para definir los diferentes tipos de precios utilizados ha sido la siguiente:

- Precio unitario simple: cada uno de los elementos de mano de obra, materiales y maquinaria que intervienen en la formación de un elemento complejo o auxiliar de una unidad de obra, por ejemplo, la cantidad de cemento, la hora de alquiler de una máquina, la hora de peón, etc.
- Precio auxiliar: conjunto de precios unitarios simples que permiten obtener el precio de un material preparado y consumido pie de obra, por ejemplo, el m³ de mortero u hormigón.
- Precios descompuestos o unidades de obra: conjunto de precios simples o auxiliares que configuran una unidad de obra realizada por un grupo de especialistas como, por ejemplo, el m² de revestimiento a base de yeso proyectado.
- Precio complejo: partida de obra formada por otros precios unitarios, que definen una unidad de obra más amplia que la de una partida y que es realizada por uno o varios grupos de especialistas como, por ejemplo, el m² cerramiento de fachada formado por dos hojas y aislante en la cámara de aire.

Para el estudio se ha determinado en primer lugar el precio unitario simple de las materias primas utilizadas, para luego elaborar los precios auxiliares de cada uno de los morteros prescritos.

Los precios auxiliares se ha determinado mediante el Programa Menfis y los rendimientos aplicados se han sido obtenido de la Base de Datos de Precios de la Construcción Castilla y León.

7.2. VALORACIÓN CUANTITATIVA

7.2.1. Precios simples unitarios

Los precios simples unitarios de las materias primas se han obtenido solicitando los precios de los mismos a almacenes y distribuidores de materiales de construcción, mientras que los rendimientos y los precios de la mano de obra se han obtenido de la Base de Datos Precios de Castilla y León.

PRECIOS SIMPLES DE LOS MATERIALES	
Materiales	Coste materias primas
Cemento CEM I 42,5	98,25 €/T
Arena lavada	7,70 €/T
Arcilla expandida 2-4	20,80 €/m ³
Arcilla expandida 3-8F	20,80 €/m ³
Agua s/ Ayunta. Burgos	0,36 €/m ³

Tabla 7.1: Precios simples de los materiales.

PRECIO DE LA MANO DE OBRA	
Mano de obra	Coste por hora
Peón ordinario construcción	12,95 €/h

Tabla 7.2: Precios de la mano de obra.

PRECIO DE LOS MEDIOS AUXILIARES	
Medio auxiliar	Coste por hora
Hormigonera eléctrica	1,20 €/h

Tabla 7.3: Precio de los medios auxiliares.

Todos los precios de los materiales son puestos en obra, por lo que no es necesario incrementarles los costes imputables al transporte.

El coste de los áridos reciclados se ha obtenido solicitando precio a varias Plantas de Reciclaje. En el caso de la arena reciclada mixta (ARM) todas las Plantas disponen de grandes acopios y los precios son relativamente bajos. No ocurre así en el caso de las arenas procedentes de hormigón reciclado (ARH), ya que este tipo de áridos no es muy habitual. Tanto en la ciudad de Burgos como en su Provincia no existe ninguna Planta de Reciclaje que comercialice este agregado por lo hubo que buscar alternativas de suministro en otras zonas de la geografía regional próximas a Burgos.

La única Planta de Reciclado que dispone de este producto en la Comunidad de Castilla y León es la Planta de Reciclado de Estejosan S.L., localizada en la ciudad de Toro (Zamora). Por este motivo, tal y como se muestra en la Tabla 7.6, el precio final del árido reciclado de hormigón se ve afectado por los costes de transporte, siendo éstos superiores al valor del material.

COSTE TRANSPORTE DEL ÁRIDO RECICLADO HORMIGÓN	
Distancia (ida + vuelta)	380 km
Tiempo ida + vuelta + carga	5,30 h.
Hora camión 3 ejes 13 m ³	39,00 €/h
Repercusión por Tn	8,61 €/T

Tabla 7.4: Coste transporte del ARH.

COSTE TRANSPORTE DEL ÁRIDO RECICLADO MIXTO	
Distancia (ida + vuelta)	20 km
Tiempo ida + vuelta + carga	1 h.
Hora camión 3 ejes 13 m ³	39 €/h
Repercusión por T	1,63 €/T

Tabla 7.5: Coste transporte del ARM.

Los precios de los áridos reciclados empleados para la fabricación de los morteros diseñados para la elaboración de esta Tesis, puestos en obra, se muestran en la Tabla 7.6.

PRECIOS SIMPLES DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS			
Tipo árido reciclado	Coste material	Transporte	Total
Árido reciclado mixto	1,75 €/T	1,63 €/T	3,38 €/T
Árido recicl. hormigón	1,75 €/T	8,61 €/T	10,36 €/T

Tabla 7.6: Precio simples de los áridos reciclados puesto en obra.

7.2.2. Precios auxiliares de los morteros

Los precios auxiliares referidos al m³, de los diferentes morteros diseñados en esta Tesis se muestran en las Tablas 7.7, 7.8, 7.9 y 7.10.

PRECIO m ³ MORTERO BASE (MB)				
UD	Descripción	Precio	Cantidad	Importe (€)
T	Cemento gris CEM I 42,5	98,25	0,38	37,34
T	Arena lavada	7,70	1,54	11,86
m ³	Agua	0,36	0,25	0,09
h	Peón ordinario construcción	12,95	2,00	25,90
h	Hormigonera eléctrica	1,20	0,50	0,60
Total				75,79 €/m³

Tabla 7.7: Precio m³ mortero base (MB).

PRECIO m ³ MORTERO REFERENCIA (MR)				
UD	Descripción	Precio	Cantidad	Importe (€)
T	Cemento gris CEM I 42,5	98,25	0,41	40,28
T	Arena lavada	7,70	0,41	3,16
m ³	Arcilla expandida 3-8 F	20,80	0,23	4,78
m ³	Arcilla expandida 2-4	20,80	0,66	13,73
m ³	Agua	0,36	0,26	0,09
h	Peón ordinario construcción	12,95	1,80	23,31
h	Hormigonera eléctrica	1,20	0,40	0,48
Total				85,83 €/m³

Tabla 7.8: Precio m³ mortero de referencia (MR).

PRECIO m ³ MORTERO DISEÑO MLH				
UD	Descripción	Precio	Cantidad	Importe (€)
T	Cemento gris CEM I 42,5	98,25	0,34	33,40
T	Árido reciclado hormigón	10,36	0,30	3,11
m ³	Arcilla expandida 3-8 F	20,80	0,19	3,95
m ³	Arcilla expandida 2-4	20,80	0,75	15,60
m ³	Agua	0,36	0,26	0,09
h	Peón ordinario construcción	12,95	1,80	23,31
h	Hormigonera eléctrica	1,20	0,40	0,48
Total				79,94 €/m³

Tabla 7.9: Precio m³ mortero diseño MLH.

PRECIO m ³ MORTERO DISEÑO MLM				
UD	Descripción	Precio	Cantidad	Importe (€)
T	Cemento gris CEM I 42,5	98,25	0,36	35,37
T	Árido reciclado mixto	3,38	0,27	0,91
m ³	Arcilla expandida 3-8 F	20,80	0,20	4,16
m ³	Arcilla expandida 2-4	20,80	0,78	16,22
m ³	Agua	0,36	0,30	0,11
h	Peón ordinario construcción	12,95	1,80	23,31
h	Hormigonera eléctrica	1,20	0,40	0,48
Total				80,56 €/m³

Tabla 7.10: Precio m³ mortero diseño MLM.

Como se puede comprobar, el estudio económico muestra que en el aligerado de los morteros base (MB) para obtener los morteros de referencia (MR), se produce un incremento del coste en un 13,25%, mientras que la sustitución del árido natural por los áridos reciclados los disminuye ligeramente.

No se ha tenido en cuenta en el estudio realizado el canon de vertido que las Plantas de Gestión de Residuos recaudan por la recogida de los residuos. Ésta cantidad consignada como “tarifa de vertido” constituye un beneficio para la Planta por ser receptora final y responsable de su tratamiento y

valorización. Además, la Planta genera ingresos adicionales por la venta de los áridos, siendo el precio diferente en las distintas Comunidades Autónomas. En la Tabla 7.11 se recogen los costes de vertido de algunas ciudades.

COSTE VERTIDO DE RESIDUOS EN PLANTAS DE RECICLADO				
Planta	RCDs mezclados	RCDs hormigón armado	RCDs hormigón limpio	Escombrosucio
Madrid	10,00 €/T	5,00 €/T	3,50 €/T	-
Albacete	16,00 €/T	20,00 €/T	9,00 €/T	25,00 €/T
Córdoba	8,50 €/T	6,70 €/T	4,00 €/T	30,05 €/T
Vitoria	9,76 €/T	-	-	-
Burgos	8,27 €/T	-	-	18,46 €/T
Zamora	18,50 €/T	6,20 €/T	3,50 €/T	22,50 €/T
Palencia	12,80 €/T	6,90 €/T		18,00 €/T

Tabla 7.11: Coste vertido de residuos en las plantas de reciclado.

Podemos establecer también un comparativo entre el precio del m³ de cada uno de los morteros diseñados de esta Tesis y sus características mecánicas.

Como se puede apreciar, el incremento de coste se produce por el proceso de aligeramiento, lo que, como se ha visto, determina una reducción de las resistencias mecánicas, mientras que la sustitución del árido natural por reciclado reduce su coste sin apreciarse disminuciones significativas en las resistencias.

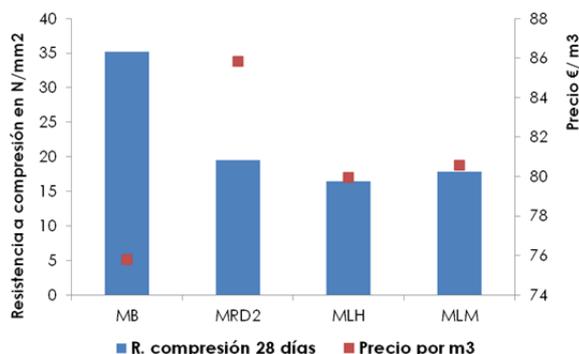


Tabla 7.12: Comparativo resistencia a compresión-coste.

7.3. VALORACIÓN CUALITATIVA

Las investigaciones científicas y la evolución de la técnica permiten afirmar que es posible desarrollar actividades económicas respetuosas con el medio natural y que concilian el progreso social con la sostenibilidad ambiental. Es preciso compatibilizar el desarrollo económico de la sociedad satisfaciendo las necesidades actuales sin poner en riesgo la de las generaciones futuras.

Para ello, el ser humano debe tener seguir comportamientos compatibles con el uso sostenible de los recursos naturales, buscando el bienestar social y el desarrollo económico como factores de evolución sostenible.

La dependencia que nuestra sociedad tiene de los recursos naturales y la necesidad de consumir recursos no renovables por debajo de su tasa de sustitución o de utilizar los recursos renovables por debajo de su tasa de renovación, determina la obligación de aprovechar al máximo las materias primas, ya sea reciclando, reutilizando o valorizando los desechos de la industria.

La escasez de reservas naturales o las restricciones normativas están condicionando el abastecimiento de los áridos naturales en las grandes ciudades, como en el caso de Madrid, lo que determina un incremento importante de los precios. Por ello, buscar alternativas más baratas y respetuosas con el medio ambiente es un reto basado en la filosofía del desarrollo sostenible, considerando no solo el precio del material sino también el valor cualitativo de los áridos reciclados.

La utilización de áridos reciclados en sustitución de los áridos naturales para la elaboración de morteros aligerados se justifica porque, de esta forma:

- Se evita el impacto ambiental y paisajístico que provocan los vertederos de residuos industriales.
- Se erradican las escombreras y los vertidos incontrolados, valorizando los residuos y evitando así la degradación del medio ambiente.
- Se alarga la vida útil de los vertederos, ya que al reciclar gran parte de los residuos de construcción se alivian las entradas de material a éstos,

teniendo en cuenta además que los escombros son los residuos más voluminosos.

- Se favorece la recuperación de los espacios naturales degradados, contribuyendo a eliminar los residuos vertidos y proporcionando zonas recuperadas para otros usos.
- Se crea empleo, debido a la posibilidad de implantar nuevas líneas de negocio en las Plantas de Reciclaje.
- Se aprovechan los desechos tratados como material para construcción, transformado un residuo en producto, disminuyendo así la necesidad de extracción de los recursos naturales limitados.

CAP. VIII CONCLUSIONES

Capítulo 8: CONCLUSIONES

8.1. CONCLUSIONES

En las investigaciones desarrolladas en esta Tesis Doctoral se ha evaluado y comparado las propiedades físicas y la durabilidad de los morteros aligerados con arcilla expandida y fabricados con diferentes clases de áridos reciclados. Los resultados obtenidos permiten establecer las siguientes conclusiones finales:

El uso de áridos reciclados en la fabricación de morteros y hormigones para construcción es una alternativa viable para contribuir al desarrollo sostenible, evitando el impacto negativo de estos residuos en el medio natural.

Transformar un residuo de demolición o deconstrucción en materia prima es una opción válida para evitar la sobreexplotación de los recursos naturales y una forma de potenciar su uso para la obtención de productos útiles de aplicación en el Sector de la Construcción.

Con relación a las especificaciones de los áridos reciclados se puede afirmar que, en general, sus prestaciones son inferiores a las de los áridos naturales. Los valores de absorción de agua, el contenido en finos, la presencia de mortero adherido en las partículas, el contenido en azufre o la presencia de impurezas, determinan que la calidad sea significativamente inferior a la del árido natural. No obstante, el árido obtenido del reciclado del hormigón presenta mejores prestaciones que el árido reciclado mixto. Por otro lado, no se ha encontrado ningún estudio en el Estado del Arte que no recomiende o impida su uso.

Respecto a las propiedades del mortero fresco

La adición de la arcilla expandida como material para el aligerado de los morteros disminuye la relación agua-cemento, efecto positivo que queda neutralizado al añadir a las mezclas el árido reciclado. El incremento

producido en la relación agua-cemento al añadir el árido reciclado, es función de su naturaleza y de su procedencia, circunstancias que determinan su composición y propiedades.

Por la naturaleza de la arcilla expandida, su inclusión en las mezclas de mortero produce un incremento del contenido en aire ocluido, circunstancia que se agudiza cuando se añaden también a las mezclas los áridos reciclados, debido al mortero adherido que contienen.

La inclusión de la arcilla expandida origina una disminución importante de la densidad. Esta disminución se ve incrementada cuando se incorporan a las mezclas los áridos reciclados, debido a que presentan también menor densidad que los áridos naturales.

Respecto a las propiedades del mortero endurecido

Respecto al comportamiento mecánico, las resistencias mecánicas del mortero aligerado con arcilla expandida han disminuido como consecuencia del incremento de huecos en la masa, debido tanto a la estructura interna porosa de la arcilla expandida como a la discontinuidad de su granulometría.

La variación de la resistencias entre los morteros de referencia y los morteros de diseño cuando se adicionan los áridos reciclados no es significativa, ni tampoco existen diferencias importantes en las propiedades mecánicas en función al tipo de árido reciclado utilizado, ya que su presencia resulta poco significativa si lo comparamos con el resto de componentes del mortero.

Existe una relación directa entre la relación agua-cemento utilizada en el diseño de las mezclas y la resistencia mecánica de éstas. Conforme se incrementa el agua de amasado, la resistencia disminuye, por lo que la calidad del árido reciclado utilizado apenas influye en este comportamiento.

Los morteros aligerados con arcilla expandida y los morteros aligerados con áridos reciclados presentan en todas las edades menores retracciones que los morteros fabricados con árido natural, siendo estos morteros los

únicos que no presentan expansiones a los 28 días. Los valores de las retracciones de todos los morteros tienden a igualarse a lo largo del tiempo.

La absorción de los morteros aumenta cuando se agregan los áridos reciclados, debido a su alta absorción. Sin embargo, el aligeramiento de los morteros con arcilla expandida hace que la absorción disminuya. En todos los morteros las mayores absorciones se presentan a edades tempranas, presentando pocas variaciones entre ellos, excepto en los morteros aligerados con arcilla expandida.

Respecto a la durabilidad

La resistencia a la abrasión de los morteros mejora con la adición de arcilla expandida en las mezclas. Por el contrario, disminuye cuando se añaden los áridos reciclados, siendo esta variación mayor cuanto menor es la calidad del árido reciclado utilizado.

El comportamiento de los morteros expuestos a ambientes industriales o en núcleos urbanos con importantes contenidos en polución, es satisfactorio. La arcilla expandida añadida a las mezclas o la adición de áridos reciclados no influyen en su comportamiento. Sí se aprecia que el mortero responde mejor cuando la calidad del árido aumenta.

De igual forma, los morteros expuestos a los ciclos de humedad-sequedad fabricados con arcilla expandida o áridos reciclados no presentan alteraciones significativas.

Por el contrario, las soluciones salinas provocan en todos los morteros incrementos de peso. Éstos son mayores cuanto más porosos son los morteros, debido a la deposición de sales en el interior de los huecos.

Las resistencias a flexión disminuyen en los morteros aligerados y no están relacionadas con la inclusión de los áridos reciclados. Sin embargo, las resistencias a compresión aumentan en todos los morteros, siendo éstas inferiores en los morteros aligerados o cuando se adicionan áridos reciclados.

Las pérdidas de masa frente a los ciclos de hielo-deshielo es menor en los morteros fabricados con arcilla expandida y se incrementa en función de la calidad del árido reciclado. No obstante, las variaciones mecánicas producidas no son significativas.

Los frentes de carbonatación no presentan diferencias significativas con la adición de arcilla expandida ni con la inclusión de áridos reciclados.

Las resistencias mecánicas frente a los procesos de carbonatación presentaron disminuciones en todos los morteros, excepto en los aligerados con arcilla expandida. La pérdida de resistencia mecánica se incrementa con la adición de áridos reciclados, siendo estas variaciones superiores en los áridos de menor calidad.

8.2. REFLEXIONES

De la búsqueda bibliográfica realizada para las investigaciones desarrolladas en esta Tesis Doctoral se ha podido constatar que existe una amplia normativa de aplicación al uso de los áridos reciclados. Sin embargo, existen muchas diferencias entre los distintos documentos y no se establecen las posibles aplicaciones en función del nivel de exigencia requerido, ni en muchos casos existen referencias a la fracción fina.

Pocos países disponen de una normativa nacional que regule el empleo de las arenas recicladas. Normalmente incluyen clasificaciones de los áridos reciclados y especificaciones para su uso en hormigón, pero no para otros usos.

Como consecuencia, al no existir referencias para la utilización de los áridos reciclados y debido al bajo precio de los áridos naturales, su uso es todavía muy minoritario. Por ello, es necesario elaborar especificaciones técnicas armonizadas para regular y garantizar el cumplimiento de unas prestaciones, en función del tipo de árido reciclado utilizado.

Sería aconsejable la divulgación de los estudios e investigaciones realizadas con áridos reciclados a estudiantes, profesionales e industrias de la

construcción, para fomentar el conocimiento de este material y potenciar su uso, dado el poco conocimiento existente en el Sector de la Construcción.

La creación de incentivos o beneficios económicos para los proyectos o constructores que usen estos agregados en construcciones de edificación y obra civil sería otro camino a investigar.

Es necesario incrementar la calidad de los áridos reciclados mediante técnicas que permitan eliminar la incertidumbre de sus propiedades. Como reto a conseguir se plantea la obtención del Mercado CE, como sucede con los áridos naturales.

Por otro lado, desde el punto de vista empresarial la prefabricación de piezas a partir de morteros con áridos reciclados es una actividad industrial de aplicación que se podría incorporarse al proceso de fabricación de cualquier empresa, sin la necesidad de modificar su sistema de producción. Quizás la actual coyuntura económica no favorezca este tipo de iniciativas, o que la concienciación social todavía no sea suficiente para hacer comprender que la sustitución de árido natural por árido reciclado supone una ventaja competitiva que cierra el ciclo de vida de los materiales, añade valor al producto final y contribuye a la sostenibilidad del Sector de la Construcción.

CAP. IX LÍNEAS FUTURAS

Capítulo 9: LÍNEAS FUTURAS

La utilización de la fracción fina de los áridos reciclados representa un reto para la industria de la construcción, aprovechando todas las fracciones del material reciclado y promoviendo una construcción sostenible.

Con la elaboración de esta Tesis Doctoral ha contribuido a fomentar el uso de los áridos reciclados obtenidos a partir de los residuos de demolición y deconstrucción, poniendo en valor este tipo de materiales como sustitutivos de los áridos naturales tradicionales.

No obstante, durante el desarrollo de las investigaciones han surgido nuevas líneas de investigación, en las que no se ha profundizado por no formar parte de los objetivos de este trabajo de investigación. Como propuestas para ampliar el conocimiento sobre este tipo de materiales reciclados se proponen las siguientes:

- Estudiar la relación que existe entre las propiedades de los distintos tipos de arenas recicladas y su efecto en la consistencia de los morteros fabricadas con ellas, la demanda de agua de las mezclas o en sus resistencias mecánicas.
- Los áridos reciclados procedentes de la demolición de fábricas de albañilería contienen importante cantidades de sulfatos debido a la pasta de yeso adherida en la superficie de las partículas. Sería conveniente un estudio profundo para valorar los posibles daños que éstos pueden ocasionar en los morteros y recomendar limitaciones a su contenido.
- Determinar si el equivalente de arena de los áridos está relacionado con el contenido en finos de los áridos o bien con naturaleza arcillosa de éstos.
- El incremento de la relación agua-cemento determina pérdidas de resistencia en los morteros por lo que sería conveniente estudiar la utilización de aditivos idóneos que mejoren esta propiedad.

- Determinar la evolución del comportamiento de los morteros aligerados frente a la carbonatación acelerada a diferentes edades.
- Realizar un estudio de viabilidad técnica para la fabricación a escala industrial de morteros con áridos reciclados, ya que su producción continuada exige garantías de calidad que, por la heterogeneidad de este tipo de áridos, es difícil de conseguir. Como mejora se propone un estudio que evalúe las posibles variaciones en las propiedades del producto final en relación al proceso de producción continua del mismo.
- Realización de pruebas industriales como elementos prefabricados para cerramientos de edificios como fachadas, paneles prefabricados etc.
- Tratamiento estadístico de los resultados y de las relaciones obtenidas entre los diferentes parámetros y variables.
- Aumentar el porcentaje de árido reciclado a utilizar en las mezclas y comprobar cómo influye en las propiedades finales de los morteros.

CAP. X BIBLIOGRAFIA

Capítulo 10: BIBLIOGRAFÍA

ACI (2008). "Guía para la Durabilidad del Hormigón." ACI 201.2R-01.

ACHE (2006). "Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural." ACHE (Asociación Científico Técnica del Hormigón Estructural).

AENOR (1989). "Norma UNE 83115. Medida del coeficiente de friabilidad de las arenas."

AENOR (1994). "UNE 83.318:94. Ensayos de hormigón. Determinación de los cambios de longitud".

AENOR (1999). Norma UNE-EN 12370. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de sales.

AENOR (1999). "UNE-EN 1015-6. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Determinación de la densidad aparente del mortero fresco". AENOR.

AENOR (1999). UNE-EN 1015-7. "Determinación del contenido en aire en el mortero fresco".

AENOR (1999). "UNE-EN 1015-19. Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros de revoco y enlucido". AENOR.

AENOR (2000). "UNE-EN 1015-3. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Determinación de la consistencia del mortero fresco". AENOR.

AENOR (2000). "UNE-EN 1015-10. Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido". AENOR.

AENOR (2000). "UNE-EN 1015-12. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Determinación de la resistencia a la adhesión de los morteros para revoco y enlucido endurecidos aplicados sobre soportes". AENOR.

AENOR (2001). UNE-EN 1097-6: "Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Determinación de la densidad de las partículas y la absorción de agua". AENOR.

AENOR (2003). "Norma UNE-EN 1015-18. Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido."

AENOR (2003). "UNE-EN 13.055-1. Aridos ligeros. Parte 1 : Aridos ligeros para hormigón, mortero e inyectado". AENOR.

AENOR (2003). "UNE-EN 13.139. Aridos para morteros". AENOR.

AENOR (2004). NORMA UNE-EN 14157. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a abrasión.

AENOR (2005). "UNE-EN 1015-17. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Determinación del contenido en cloruros solubles en agua de los morteros frescos". AENOR.

AENOR (2006). "UNE-EN 933-1. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Determinación de la granulometría de las partículas. Métodos del tamizado. AENOR.

AENOR (2007). "UNE-EN 1015-2 . Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Toma de muestra total de morteros y preparación de los morteros para ensayo" AENOR.

AENOR (2007). "UNE-EN 1015-9. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Determinación del periodo de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco".

AENOR (2007). "UNE-EN 1015-10. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido". AENOR.

AENOR (2007). "UNE-EN 1015-11. Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido". AENOR.

AENOR (2008). ""Norma UNE-83966. Durabilidad del hormigón. Acondicionamiento de las probetas de hormigón para los ensayos de permeabilidad a gases y capilaridad.""

AENOR (2008). "Norma UNE-CENTS/TS 12390-9 EX. Ensayos de hormigón endurecido. Resistencia al hielo-deshielo. Pérdida de masa superficial."

AENOR (2008). ""Norma UNE 83982. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido"."

AENOR (2009). UNE-EN 933-11 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos.

AENOR (2010). "UNE-EN 934-2. Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para morteros de albañilería. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado". AENOR.

AENOR (2010). "UNE-EN 998-1. Especificaciones para los morteros de albañilería. Parte 1 : Morteros para enlucido y revoco". AENOR.

AENOR (2010). "UNE-EN 1744-1. Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Análisis químico". AENOR.

AENOR (2010). "UNE-EN 1744-1. Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Análisis químico" AENOR.

AENOR (2011). "UNE-EN 413-1. Cementos de albañilería. Composición, especificaciones y criterios de conformidad". AENOR.

AENOR (2011). "UNE-EN 459-1. Cales para construcción. Composición, especificaciones y criterios de conformidad". AENOR.

AENOR (2012). UNE-EN 998-2 : "Especificaciones para morteros de albañilería. Parte 2 : Morteros de albañilería". AENOR.

AENOR (2013). "UNE 80103 . Métodos de ensayo de cementos. Ensayos físicos. Determinación de la densidad real"

Agrela, F., M. Sanchez de Juan, et al. (2011). "Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete." *Construction and Building Materials* 25 (10) 25(10): 3950-3955.

Agrela, F., M. Sánchez de Juan, et al. (2011). "Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete." *Construction and Building Materials* 25(10): 3950-3955.

Alaejos, M. P. (2006). "Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural." ACHE

- Alaejos, M. P. and M. Sánchez de Juan (2004). Utilization of recycled concrete aggregate for structural concrete. Conference on the use of recycled materials in building and structures. RILEM. Barcelona
- Alejandre Sánchez, F. (2002). "Tesis Doctoral "Historia, caracterización y restauración de morteros"." Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción de la Universidad de Sevilla.
- Álvarez Cabrera, J. L., F. Urrutia, et al. (1997). "Morteros de albañilería con escombros de demolición." *Materiales de Construcción* 47(246).
- Aneiros Rodríguez, L. M. (2008). "Tecnología de las plantas de reciclaje de RCD y niveles tecnológicos en la UE." *Residuos* 103: 56-64.
- Angulo, S. C. and A. Mueller (2009). "Determination of construction and demolition recycled aggregates composition, in considering their heterogeneity." *Materials and Structures* 42(6): 739-748.
- Angulo, S. C., C. Ulsen, et al. (2004). haracterization of Brazilian construction and demolition waste coarse recycled aggregate. International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures. RILEM. Brazil, Publications SARL: 87-96.
- Arce Pezo, X. (1997). *Hormigones Livianos*, Escuela Superior del Litoral.
- ASTM (2007). *Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates*. A. S. f. T. a. M. (ASTM). Philadelphia.
- Babu, K. G. and D. S. Babu (2003). "Behavior of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume." *Cement and Concrete Research* 33(5): 755-762.
- Bairagi, N. K., K. Ravande, et al. (1993). "Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates." *Resources, Conservation and Recycling* 9(1-2): 109-126.
- Barbudo, A., F. Agrela, et al. (2012). "Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications." *Construction and Building Materials* 28(1): 129-138.

- Barra de Oliveira, M. and E. Vázquez (1996). "The influence of retained moisture in aggregates form recycling on the poperties of new hardned concrete." *Waste Management* 16(1-3): 113-117.
- Barra, M. (1996). *Estudio de la Durabilidad del Hormigón de Árido Reciclado en su aplicación como Hormigón Estructural*, Universidad Politécnica de Cataluña.
- Bektas, F., K. Wang, et al. (2009). "Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability." *Construction and Building Materials* 23(5): 1909-1914.
- Benito, M., A. Cladera, et al. (2011). "Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use." *Construction and Building Materials* 27(1): 612-622.
- Böhmer, S. (2008). "Aggregates case study." Final Report referring to contract 150787 F1SC-AT . Viena.
- Böhmer, S. (2008). "Aggregates case study." Final Report referring to contract nº 150787 F1SC-AT . Viena.
- Buck A.D. (1977). "Recycled Concrete as Source of Aggregate." *Journal of American Concrete Institute* 74(5): 212-219.
- Buck, A. D. (1973). "Recycled concrete." *Highway Research Record*.
- Buildex Inc. (2012). "Haydite -Shale Lightweight Aggregate."
- Bustillo, M. (2010). *Manual de RCD y áridos reciclados*, Fueyo Editores.
- Calvo Pérez, B., J. L. Parra y Alfaro, et al. (2002). "Áridos reciclados para hormigones y morteros. Caracterización mineralógica y química."
- CEDEX (2013). *Transferencia tecnológica relativa a materiales de construcción, incluyendo materiales marginales y residuos aprovechables*, Ministerio de Agricultura, Alimemtación y Medio Ambiente.
- Clay and Slate Institute (1971). *Light weight concrete*.
- Comunidad de Madrid (2006). *Plan Gestión Residuos de la Comunidad de Madrid 2006-2016*.
- Conway, T. and W. Behie (2006). "Sand gradation influence on masonry mortar properties." *Masonry Today* 16: 1-4.

- Corinaldesi, V. (2009). "Mechanical behavior of masonry assemblages manufactured with recycled-aggregate mortars." *Cement and Concrete Composites* 31(7): 505-510.
- Corinaldesi, V., M. Giuggiolini, et al. (2002). "Use of rubble from building demolition in mortars." *Waste Management* 22(8): 893-899.
- Corinaldesi, V. and G. Moriconi (2009). "Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate." *Construction and Building Materials* 23(1): 289-294.
- Corinaldesi, V. and G. Moriconi (2009). "Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete." *Construction and Building Materials* 23(8): 2869-2876.
- Cowan, H. J. (1977). "History of masonry and concrete domes in building construction." *Build Environ* 12: 1-24.
- Chandra, S. and L. Berntsson (2002). "Lightweight Aggregate Concrete: Science, Technology, and Applications." Chalmers University of Technology de Suecia. Noyes Publications. Norwich, New York, U.S.A.
- Chen, H.-J., T. Yen, et al. (2003). "Use of building rubbles as recycled aggregates." *Cement and Concrete Research* 33(1): 125-132.
- Dapena, E., P. Alaejos, et al. (2011). "Effect of Recycled Sand Content on Characteristics of Mortars and Concretes." *Journal of Materials in Civil Engineering* 23(4): 414-422.
- Davison, J. L. (1961). "Loss of moisture from fresh mortars to bricks." *Materials Researchs and Standards* 1: 385-388.
- de Juan, M. S. and P. A. Gutiérrez (2009). "Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate." *Construction and Building Materials* 23(2): 872-877.
- Debieb, F., L. Courard, et al. (2009). "Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates." *Construction and Building Materials* 23(11): 3382-3387.

- Debieb, F., L. Courard, et al. (2010). "Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates." *Cement and Concrete Composites* 32(6): 421-426.
- Debied, F. and S. Kenai (2008). "The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete." *Construction and Building Materials* 22(5): 886-893.
- Deshpande, N. and S. S. Kulkarni (2011). "Critical analysis of Recycled aggregate and concrete with Recycled aggregate." *Applied Mechanics and Materials* 99-100: 1274-1280.
- Djerbi Tegguer, A. (2012). "Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach." *Construction and Building Materials* 27(1): 112-116.
- Draganovic, A. and H. Stille (2011). "Filtration and penetrability of cement-based grout. Study performed with a short slot." *Tunneling Underground Space Technology* 26(4): 548-559.
- Elias Castells, X. (2001). "Árido ligero expandido a base de residuos. Aspectos Técnicos Económicos." *Revista de la Bolsa Nacional de Residuos y Subproductos Industriales de Colombia*.
- Etxeberria, M., E. Vázquez, et al. (2007). "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete." *Cement and Concrete Research* 37(5): 735-742.
- European Demolition Association - EDA (1992). "Demolition and Construction Debris : Questionnaire about an EC Priority Waste Stream."
- Evangelista, L. and J. de Brito (2007). "Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates." *Cement and Concrete Composites* 29(5): 397-401.
- Evangelista, L. and J. de Brito (2010). "Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates." *Cement and Concrete Composites* 32(1): 9-14.
- Fernández Cánovas, M. (1989). *Hormigon*, ETS de Ingenieros de Caminos.

- Fonseca, N., J. de Brito, et al. (2011). "The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste." *Cement and Concrete Composites* 33(6): 637-643.
- Formosa, J., L. Haurie, et al. (2008). "Comparative study of magnesium by products and vermiculite formulations to obtain fire resistant mortars." *Materials Scientific Forum(sium)*: 588-588 , 898-902.
- Frondistou-Yannas, S. (1977). "Waste concrete as aggregate for a new concrete." *J Am Concrete Institute* 74(8): 373-376.
- Galli Agustina, P. (2007). *Las inmigraciones italianas y su aporte técnico ornamental a la arquitectura y urbanismo*, Universidad de Belgrado.
- Gárate Rojas, I. (1994). *Artes de la Cal. D. G. d. B. A. y. Archivos*. Madrid, Ministerio de Cultura.
- Gaspar Tebar, D. and M. Muñoz Plaz (1991). "Accion del CO2 sobre un cemento portland: Influencia sobre las característias químicas y fisicomecánicas." *Materiales de Construcción*(611): 37-53.
- GEAR, P. (2012). *Guía Española de áridos reciclados procedentes de RCD*.
- GEHO-CEB, G. E. d. H. (1997). "Hormigones de alta resistencia."
- Geraldes, V. L. (2013). "Estudio de hormigones reciclados no estructurales fabricados con árido reciclado mixto: propiedades mecánicas y expansión debida al contenido en sulfatos". Universidad Politécnica de Madrid.
- Gibson, L. J. and M. F. Ashby (1999). "Cellular solids: structure and porperties " Cambridge University Press: 453-467.
- Glushge, P. (1946). "Gidrotskhnicheskoge Stroitelstvo." *The work of the Scientific Research Institute. Research Institute* 4: 27-28.
- Gómez Sobreron, J. M. V. (2002). "Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study." *Cement and Concrete Research* 32(8): 1301-1311.
- González-Fonteboa, B. and F. Martínez-Abella (2008). "Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties." *Building and Environment* 43(4): 429-437.

- González, B., B. Llamas, et al. (2007). "Tests on concrete containing cork powder admixtures." *Materiales de Construcción* 57(286): 83-90.
- González Fonteboa, B. (2002). *Hormigones con Aridos Reciclados procedentes de Demoliciones, Dosificaciones, Propiedades Mecánicas y Comportamiento Estructural a Cortante*, Universidad Politécnica A Coruña.
- González Fonteboa, B. and F. Martínez Abella (2005). "Recycled aggregates concrete: Aggregate and mix properties " *Materiales de Construcción* 55(279): 53-66.
- González Fonteboa, B., F. Martínez Abella, et al. (2011). "Stress-strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate." *Construction and Building Materials* 25(5): 2335-2342.
- Gouny, F., F. Fouchal, et al. (2012). "A geopolymer mortar for wood and earth structures." *Construction and Building Materials* 36: 188-195.
- Graf, O. (1948). "Über Ziegelsplittbeton, Sandteinbeton und Trummerschuttbeton." *Die Bauwirtschaft* 2-4.
- Grenestedt, J. L. (1999). "Effective elastic behavior of some models for perfect cellular solids." *International Journal of Solids and Structures* 36.
- Grupo de Trabajo 2/5 "Hormigón Reciclado" (2006). "Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural."
- Gutiérrez González, S., J. Gadea, et al. (2012). "Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes." *Construction and Building Materials* 28: 653-658.
- Hansen, T. C. (1986). *Recycled aggregates and recycled concrete. Second state of the art report developments*. RILEM.
- Hansen, T. C. and H. Narud (1983). "Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate." *Concrete International* 5(1): 79-83.
- Hendriks, C. F., G. Janssen, et al. (2005). *Recycled aggregate in concrete*, RILEM.
- Hincapié Henao, A. M. and E. A. Aguja López (2003). "Agregado para morteros." *EAFIT* 39(132): 76-89.

- Höberg, E. (1967). "Mortar bond." Byggforskningens Rapport.
- Hollaway, L. C. (2003). "The evolution of and the way forward for advance polymer composites in the civil infrastructure." *Construction and Building Materials* 17: 365-378.
- Hornain, H. (1976). *Carbonatación del Concreto*. RILEM. Wexham-Springs. Inglaterra.
- Hosking, R. (1992). "Road aggregates and skidding." TRL. London.
- Hou Huang, D. E., J. L. Caicedo Chica, et al. (2009). "Hormigones Livianos de alto desempeño." *Revista Tecnológica ESPOL*.
- Hung, L. V., V. H. Nam, et al. (2008). Study on recycled demolished building waste to use as aggregate for concrete for concrete and mortar. The 3^o ACF International Conference- ACV/VCA: 644-650.
- IHOBE (2011). *Usos de áridos reciclados mixtos procedentes de residuos de construcción y demolición*. I. S. P. d. G. Ambiental.
- Jiménez, J. R., F. Agrela, et al. (2011). "Estudio comparativo de los aridos reciclados de hormigón y mixtos como material para sub-base de carreteras." *Materiales de Construcción* 61 n° 302(Abril-Junio 2011): 289-302.
- Jiménez Montoya, P., A. García Meseguer, et al. (2000). *Hormigón armado*. Barcelona.
- JIS A 5022 (2006). *JIS A 5022. Recycled aggregate for concrete class M*. J. S. Association. Tokio, Japan.
- JIS A 5023 (2007). *JIS A 5023. Recycled aggregate for concrete class L*. J. S. Association. Tokio, Japan.
- Jungmann, A. and J. Quindt (1998). *Properties of Recycled form Concrete, Demolition and Reuse of Concrete and Masonary*.
- Kasai, Y. (1994). *Guidelines and the Present State of the Reuse of Demolished Concrete in Japan*. London, E&FN Spon.
- Katz, A. (2003). "Properties of concrete made whit recycled aggregate from partially hydrated old concrete. ." *Cement and Concrete Research* 33 (5): 703-711.

- Katz, A. (2003). "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete." *Cement and Concrete Research* 33(5): 703-711.
- Kettle, R. J. and M. Sadegzadeh (1987). "Field investigations of abrasion resistance." *Materials and Structures* 20(2): 96-102.
- Khatib, J. M. (2005). "Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate." *Cement and Concrete Research* 35(4): 763-769.
- Kohler, G. and H. Kurkowski (1998). "Optimising the Use of RCA. Use of Recycled Concrete Aggregate, Sustainable Construction." Dhir, Henderson y limachiya.
- Kong, D., T. Lei, et al. (2010). "Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete." *Construction and Building Materials* 24(5): 701-708.
- Lanzón, M. and P. A. García Ruiz (2008). "Lightweight cement mortars : Advantages and inconveniencias of expanded perlite and its influence on fresh and hardened state and durability." *Construction and Building Materials* 22(8): 1798-1806.
- Laplante, P., P. Aitcin, et al. (1991). "Abrasion Resistance of Concrete." *Journal of Materials in Civil Engineering* 3(1): 19-28.
- Larbi, J. A., W. M. M. Heijnen, et al. (2000). Preliminary Laboratory Investigation of Thermally Treated Recycled Concrete Aggregate for General Use in Concrete. The fourth International Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction whit Alternative Materials. United Kingdom.
- Lee, S.-T. (2009). "Influence of recycled fine aggregates on the resistance of mortars to magnesium sulfate attack." *Waste Management* 29(8): 2385-2391.
- Limbachiya, M. C., E. Marrocchino, et al. (2007). "Chemical–mineralogical characterisation of coarse recycled concrete aggregate." *Waste Management* 27(2): 201-208.
- López Gayarre, F. (2008). Influencia de la variación de los parámetros de dosificación y fabricación de hormigón reciclado estructural sobre sus propiedades físicas y mecánicas, Universidad de Oviedo.

- López Gayarre, F., P. Serna, et al. (2009). "Influence of recycled aggregate quality proportioning criteria on recycled concrete properties." *Waste Management* 29(12): 3022-3028.
- Luaces, C. (2007). *Los áridos y el cemento. El recorrido de los materiales*. C. d. E. e. I. Tecnológica, Comunidad de Madrid.
- Luguez, J. and J. Schumager (1971). "Observations sur la tenue de revêtements selles sur murs préfabriqués en béton d'argile expansée " *Cahiers du C.S.T.B n°* 122 (1057).
- Malhorta, V. (1976). "Use of Recycled concrete as a new Aggregate." Canadian Center of Mineral and Energy Technology.
- Manso, J. M., Á. Rodríguez, et al. (2011). "The durability of masonry mortars made with ladle furnace slag." *Construction and Building Materials* 25(8): 3508-3519.
- Mansur, M. A., T. H. Wee, et al. (1999). "Crushed bricks as coarse aggregate for concrete." *ACI Materials Journal* 96: 478-484.
- Marinković, S., V. Radonjanin, et al. (2010). "Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete." *Waste Management* 30(11): 2255-2264.
- Marmash, B. E. and K. S. Elliott (2000). The properties of recycled precast concrete hollow core slabs for use as replacement aggregate in concrete. *Waste Management Series*. 1: 769-781.
- Marmash, B. E. and K. S. Elliott (2000). "The properties of recycled precast concrete hollow core slabs for use as replacement aggregate in concrete." *Waste Management Series* 1(C): 769-781.
- Martín-Morales, M., M. Zamorano, et al. (2011). "Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08." *Construction and Building Materials* 25(2): 742-748.
- Martin, I. (2003). "Características Técnicas y aplicaciones con hormigón liviano." *Hormigón y acero*: 228-229.

- Martínez, I., M. Etxeberria, et al. (2013). "A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars." *Construction and Building Materials* 49: 384-392.
- Martins, I. (2005). "Use of the fraction."
- Mas, B., A. Cladera, et al. (2012). "Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use." *Construction and Building Materials* 27(1): 612-622.
- Medina, C., M. I. Sánchez de Rojas, et al. (2011). "Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes." *Cement and Concrete Composites* 13(8): 439-447.
- Mesbah, H. A. and F. Buyle-Bodin (1999). "Efficiency of polypropylene and metallic fibres on control of shrinkage and cracking of recycled aggregate mortars." *Construction and Building Materials* 13(8): 439-447.
- Metha, P. K. and P. J. M. Monteiro (2006). "Concrete: microstructure, properties and materials." New York.
- Meyers, S. L. (1949). "Rock Products." 96-98.
- Ministerio de Fomento (1979). "NBE-CT-79. Norma Básica. Condiciones Térmicas". M. d. Fomento.
- Ministerio de Fomento (2006). "Código Técnico de la Edificación. DB-SE-F Estructuras de fábrica".
- Ministerio de Fomento (2008). "Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08."
- Ministerio de Fomento (2009). "Instrucción para la Recepción de Cementos RC-08."
- Ministerio de Medio Ambiente (2001). Plan Nacional de Residuos(2001-2006). BOE nº 166 pag. 25305-25313.
- Ministerio de Medio Ambiente (2009). "Plan Nacional Integrado de Residuos (2008-2015)." BOE nº 49 de 26 de Febrero de 2009: 19893-20016.
- Ministerio de Medio Ambiente (2011). "Ley 22/2011 Residuos y suelos contaminados." BOE nº 181 de 29 de Julio de 2011.

Miranda, L. and S. Selmo (2002). "Construction and demolition waste variability and its influence on masonry and plastering mortars properties." University of Sao Paulo. Escola Politécnica. Civil Construction Engineering Department.

Miranda, L. and S. Selmo (2006). "CDW recycled aggregate renderings: Part I - Analysis of the effect of materials finer than 75 μm under accelerated aging performance " *Construction and Building Materials* 20(9): 625-633.

Moreno, E. I. (1999). "Carbonation of blended cement concretes." University of South Florida.

Moriconi, G., V. Corinaldesi, et al. (2003). "Environmentally-friendly mortars: a way to improve bond between mortar and brick." *Materials and Structures* 36(10): 702-708.

Müller, A. (2004). "Lightweight aggregates from masonry rubble."

Mulder, E., J. Blaakmeer, et al. (2003). Closed Material Cycles for Concrete and Masonry, as Part of an Integrated Process for the Reuse of the Total Flow of C&D Waste. Proceedings of the Fifth International Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials San Sebastian.

Nagataki, S., A. Gokce, et al. (2000). Effects of recycled aggregate characteristics on the performance parameters of recycled aggregate concrete. Proceedings of the Fifth Canmet/ACI International Conference on Durability of Concrete. Barcelona: 51-71.

Nagataki, S., A. Gokce, et al. (2004). "Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates." *Cement and Concrete Research* 34(6): 965-971.

NB 26 (2003). NB 26. Recycling of concrete and masonry for production of concrete.

NBR 15116 (2005). Norma Brasileira NBR 15116. Agregados reciclados de resíduos sólidos de construção civil. Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural.

Newman, A. J. (1946). "The utilization of brick rubble from demolished shelters as aggregate for concrete." *Institute for Municipal Engineering* 72(2): 113-121.

- Nixon P.J. (1978). "Recycled Concrete as an Aggregate for Concrete." *Materiales y Construcción* 11: 371-378.
- Novoa, P. J., M. C. Ribeiro, et al. (2004). "Mechanical characterization of lightweight polymer mortar modified whit cork granulates." *Compos Sci Technology* 64: 2197-2205.
- Ocampo, I., O. Vuanello, et al. (2010). EStudio de la carbonatación acelerada en probetas de hormigón armado. VI congreso Internacional de Patología y recuperación de estructuras. Córdoba.Argentina.
- Olorunsogo, F. T. and N. Padayachee (2002). "Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes." *Cement and Concrete Research* 32(2): 179-185.
- Orden MAM 304/2002 (2002). Lista Europea de Residuos (LER). BOE nº43, 6494-6515.
- Otsuki, N., S. Miyazato, et al. (2003). "Influence of Recycled Aggregate on Interfacial Transition Zone, Strength, Chloride Penetration and Carbonation of Concrete." *Journal of Materials in Civil Engineering* 15(5): 443-451.
- Pacheco-Torgal, F., Y. Dingb, et al. (2012). "Are geopolymers more suitable than Portland cement to produce high volume recycled aggregates HPC?" *Construction and Building Materials* 36: 1048-1052.
- Padmini, A. K., K. Ramamurthy, et al. (2009). "Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete." *Construction and Building Materials* 23(2): 829-836.
- Parra Henao, D. L. (2000). "Estudio preliminar de expansión térmica de arcillas a escala de laboratorio." Universidad Nacional de Colombia –Sede Medellín-. Facultad Nacional de Minas.
- Pelugo, M. J., A. Domingo Cabo, et al. (2009). Analysis of moisture state of recycled coarse aggregate and its influence on compression strength of the concrete. Evolution and Trends in Desing. Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures. U. P. d. Valencia.

- Peng, J. H., M. F. Chen, et al. (2002). "Study on waste expanded polystyrene as lightweight aggregate for thermal insulating mortar." *Jianzhu Cailiao Xuebao/J Build Mater* 166.
- Poon, C. S. and D. Chan (2007). "Effects of contaminants on the properties of concrete paving blocks prepared with recycled concrete aggregates." *Construction and Building Materials* 21(1): 164-175.
- Poon, C. S., S. C. Kou, et al. (2002). "Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks." *Construction and Building Materials* 16(5): 281-289.
- Portland Cement Association (1968). "Structural Lightweight Concrete. Design and Control of Concrete Mixtures."
- Ravindrarajah, R. S., Y. H. Loo, et al. (1988). "Strength Evaluation of Recycled Aggregate concrete by in situ tests." *Materials and Structures* 21: 289-295.
- Ravindrarajah, R. S. and C. M. Tam (1988). "Methods of Improving the Quality of Recycled Aggregate Concrete." RILEM.
- Reglamento 305 (2011). Reglamento 305/2011. Reglamento de Productos de Construcción, DOUE : Diario Oficial de la Unión Europea.
- RILEM-International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures (2006). "Demolición y Reciclajes del concreto y la mampostería, especificaciones para concreto con agregados reciclados."
- RILEM (1994). "Specifications for concrete with recycled aggregates." *Materials and Structures* 27(9): 557-559.
- Río Merino, M. (2005). Nuevas aplicaciones del corcho en el campo de la edificación. III encuentro Eurocork. Eurocork. Huelva.
- Río Merino, M. d., J. Santa Cruz Astorqui, et al. (2005). "Morteros aligerados con arcilla expandida: Influencia de la granulometría en la adición de fibras de vidrio AR en el comportamiento mecánico."
- Roberto Martínez, D. (2010). Concreto Liviano estructural con arcilla expandida termicamente extraída de canteras localizadas en el sur de la sabana de bogota, Universidad Nacional de Colombia.

- Rodríguez Mora, O. (2003). "Morteros.Guía general." Afam (Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero).
- Rodríguez Sáiz, A. (2008). Fabricacion de Morteros de Albañilería con escoria blanca de horno cuchara y su utilización en construcción, Universidad de Burgos.
- Rodríguez Sáiz, A. (2008). "Tesis Doctoral. Fabricación de morteros de albañilería con escoria blanca de horno cuchara y su utilización en construcción."
- Roman Alema, B. and P. Torres Zacarías (2010). Mortero de yeso con vermiculita expandida, aditivado y porcedimiento para su obtención. ES2331043B1.
- Ryu, J. S. (2002). "An experimental study on the effect of recycled aggregate on concrete properties." Magazine of Concrete Research 54(1): 7-12.
- Sagoe-Crentsil, B. (1998). "Guide Specifications for Recycled Aggregates in Concrete Construction."
- Sagoe-Crentsil, K. and T. Brown (1998). Guide for Specification of Recycled Concrete Aggregates (RCA) for Concrete Production. CSIRO, Building, Construction and Engineering. Victoria, Australia.
- Sagoe-Crentsil, K. K., T. Brown, et al. (2001). "Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate." Cement and Concrete Research 31(5): 707-712.
- Sánchez de Juan, M. (2004). "Tesis Doctoral. "Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural".".
- Sánchez de Juan, M. and M. P. Alaejos (2005). Influencia del Árido Reciclado en las propiedades del Hormigón Estructural. III Congreso de ACHE. Puentes y estructuras del siglo XXI, sostenibilidad, innovación y retos de futuro, Zaragoza.
- Sánchez de Juan, M. and M. P. Alaejos (2010). "Ficha Técnica sobre los residuos de construcción y demolición. Actualización deñ catálogo de residuos utilizables en la construcción." Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino.
- Sani, D., G. Moriconi, et al. (2004). "Leaching and mechinal behaviour of concrete manufactured with recycled aggregates." Waste Management 25: 177-182.
- Shalom, R. and I. Soroka (1964). "Consistency of cement-limemortars." Materials Research and Standards 4: 465-471.

Silva, J., J. Brito de, et al. (2008). "Fine ceramics replacing cement in mortars. Partial replacement of cement with fine ceramics in rendering mortars." *Materials and Structures* 41: 1333-1334.

Silva, J., J. d. Brito, et al. (2009). "Incorporation of fine ceramics in mortars." *Construction and Building Materials* 23(1): 556-564.

Sim, J. and C. Park (2011). "Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate." *Waste Management* 29(9): 2352-2548.

Skalny, J., V. Johansen, et al. (1996). "Una forma de ataque por sulfatos." *Materiales de Construcción* 46(244).

Skeen, J. W. (1971). "Experiments on the train penetration of brick work II : The effect of mortars type." *Transactions and Journal of the British Ceramic Society* 70: 631-6343.

Soutsos, M. N., K. Tang, et al. (2011). "Concrete building blocks made with recycled demolition aggregate." *Construction and Building Materials* 25(2): 726-735.

Tam, V. W. Y., X. F. Gao, et al. (2005). "Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach." *Cement and Concrete Research* 35(6): 1195-1203.

Tam, V. W. Y. and K. N. Le (2007). "Aggregate testing using 2nd-, 7th- and 10th-order interpolation polynomials." *Resources, Conservation and Recycling* 52(1): 39-57.

Tam, V. W. Y., C. M. Tam, et al. (2007). "Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches." *Resources, Conservation and Recycling* 50(1): 82-101.

Tam, V. W. Y., K. Wang, et al. (2008). "Assesing relationships of concrete recycling decision and implementation in construction industry." *Journal of hazardous materials* 152(2): 703-714.

Tarun R. Naik, S. S. S. and M. H. Mohammad "Abrasion Resistance of High-Strength Concrete Made with Class C Fly Ash." *Materials Journal* 92(6).

- Tavakoli, M. and P. Soroushian (1996). "Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate." *ACI Materials Journal* 93(2): 182-190.
- Toscano Machado, E. A. (2008). *Gestión de la Ciencia y Tecnología para el reciclado de los desechos sólidos de construcción*. Cuba.
- Tu, T.-Y., Y.-Y. Chen, et al. (2006). "Properties of HPC with recycled aggregates." *Cement and Concrete Research* 36(5): 943-950.
- Ulloa Mayorga, V. A. (2012). *Durabilidad de hormigones armados, con árido reciclado: Una evaluación de la corrosión en un ambiente marino*, Unversitar Politecnica de Valencia.
- Urbanismo, M. d. O. P. y. (1990). NBE-FL-90. F Achada de Fábrica de Ladrillo, BOE nº 93.
- Valdehita Roselló, M. T. (1976). "Morteros de cemento para albañilería." Patronato Juan de la Cierva de Investigación Técnica. Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento. Consejo Superior de Investigaciones Científicas nº 337.
- Varela Blanco, T. (2007). "Estudios avanzados sobre cementos, morteros y hormigones." Instituto de Ciencias de la Construcción. Eduardo Torroja.
- Vázquez Ramonich, E. and M. Barra de Oliveira (2002). *Hormigón de áridos reciclados : Retracción. V Seminario Desenvolvimento Susatentavel e a Reciclagem a Construcao Civil*. Brasil: 7-14.
- Vegas, I., I. Azkarate, et al. (2009). "Diseño y prestaciones de morteros de albañilería con áridos reciclados procedentes de escombros de hormigón." *Materiales de Construcción* 59.
- Venuat, M. (1972). "Aditivos y tratamientos de morteros y hormigones."
- Virella, A. (1976). "Áridos de arcilla expandida." *Sección Hormigón* Número 503.
- Wang, R. and C. Meyer (2012). "Performance of cement mortar made with recycled high impact polystyrene." *Cement and Concrete Compos* 34(9): 975-981.
- Weiger, H. and S. Karl (1974). *Hormigones Livianos Armados*.

Wonjum, p. and N. Takafumi (2013). "Influence of metal impurity on recycled aggregate concrete and inspection method for aluminum impurity." *Construction and Building Materials* 40: 1174-1183.

WRAP (2007). *Aggregate Research Program. Performance related approach to use of recycled aggregates.* WRAP.

Yagishita, F., M. Sano, et al. (1993). *Behavior of Reinforced Concrete Beams Containing Recycled Coarse Aggregate.* . Third International RILEM Symposium.

Yamato, T., Y. Emoto, et al. (1988). "Some Properties of Recycled Aggregate Concrete." *Demolition and Reuse of Concrete and Masonary. Reuse of Demolition Waste, Precedings of Second International RILEM Symposium 2:* 643-651.

Yanagi, K., M. Nakagawa, et al. (1988). *Effect of impurities in Recycled Coarse Aggregate Upon a Few Properties of the Concrete Produced with it* *Procedings of the Second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry.* Japan: 613-623.

Yang, J., D. Qiang, et al. (2011). "Concrete whit recycled concrete aggregate and crushed clay bricks." *Construction and Building Materials* 25(4): 1935-1975.

Zega, C. J. and Á. A. Di Maio (2011). "Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements." *Waste Management* 31(11): 2336-2340.

