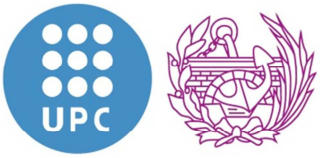


Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Título

706-TFM-342

NUEVA TÉCNICA DE DOSIFICACIÓN DE HORMIGONES RECICLADOS: MÉTODO DEL VOLUMEN DE MORTERO EQUIVALENTE

Autor/a

EDUARDO GONZÁLEZ ARIAS

Tutor/a

MARILDA BARRA BIZINOTTO, SUSANNA VALLS DEL BARRIO

Departamento

INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

Intensificación

MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Fecha

JUNIO 2012

706-TFM-342

NUEVA TÉCNICA DE DOSIFICACIÓN DE HORMIGONES RECICLADOS: MÉTODO DEL VOLUMEN DE MORTERO EQUIVALENTE

EDUARDO GONZÁLEZ ARIAS

Tutora:
Dra. Marilda Barra Bizinotto
Dra. Susanna Valls del Barrio

Tutor externo:
Cristián Jiménez Fernández

Universitat Politècnica de Catalunya
Departamento de Ingeniería de la Construcción

Junio 2012

Resumen:

Autor: Eduardo González Arias
Tutora: Marilda Barra Bizinotto
Tutor externo: Cristián Jiménez Fernández

La conciencia por temas medioambientales y la difusión del término de sostenibilidad se han incorporado en los últimos tiempos en la conciencia social y profesional, de los ciudadanos y técnicos. Esto acarrea una profunda reconversión de la situación económica actual, basada en la explotación de los recursos naturales, de manera que no repercuta en el entorno buscando una relación directa en la planificación sostenible del medio ambiente y la sostenibilidad económica.

Reconversión que afecta a todos los ámbitos y sectores siendo, sin ningún tipo de duda, el de la construcción, con todos los subsectores en los que influye, uno de los que genera un mayor impacto ambiental. Por todo esto, dicho sector y más en concreto el del hormigón-cemento necesita reorientarse hacia una política de actuación dirigida hacia el desarrollo sostenible.

Para ello, es preciso incidir en estrategias de reutilización y reciclaje de materiales que han cumplido su vida útil buscando una repercusión menor en el entorno y un consumo razonable de dicho material (cemento) para abaratar costes de producción y sobretodo reducir las emisiones de CO_2 a nivel global.

Por todo ello el motivo de esta tesis: estudiar el efecto del reciclado en hormigones (concretamente el que proviene de desechos derivados de la trituración del propio hormigón) y, por otra parte, estudiar el nuevo método de dosificación para hormigones reciclados basado en el A.C.I. que permite una reducción del consumo de cemento a la hora de diseñar las mezclas.

Para realizar este estudio, se han fabricado varios tipos de hormigón con las mismas relaciones agua/cemento e igual método de dosificación (Bolomey) para poder realizar una comparación entre ellos. El objetivo ha sido determinar las propiedades mecánicas más relevantes exigidas en un hormigón a través de varios ensayos (resistencia a compresión, módulo elástico). Adicionalmente, se han realizado distintos tipos de ensayos para determinar otras propiedades importantes (consistencia, densidad…).

Los resultados obtenidos en esta tesis experimental son concluyentes. Los hormigones derivados de desechos del hormigón, con un porcentaje de sustitución del 20% en peso, son una buena solución como hormigones estructurales al mantener las principales propiedades mecánicas de los hormigones convencionales y aprovechar las ventajas del reciclado de materiales.

Por otro lado, el método de dosificación del volumen de mortero equivalente (E.M.V.) resulta una herramienta excelente a la hora de diseñar mezclas de hormigones reciclados ya que permite combinar las ventajas del reciclado con las del ahorro de consumo de cemento (menos emisiones de CO_2 y más sostenible económicamente).

Palabras clave: sostenibilidad, residuos derivados del hormigón, hormigón reciclado, método E.M.V, consumo de cemento.

Abstract:

Author: Eduardo González Arias
Tutor: Marilda Barra Bizinotto
External tutor: Cristián Jiménez Fernández

Environmental issues awareness and diffusion of the sustainability idea have been incorporated into social and professional consciousness in recent times. In order to avoid environmental repercussions, there is a need for a deep reconversion of the actual economic trends, which are based in natural resources exploitation, by trying to achieve a direct relationship between a sustainable economy and a sustainable environmental planning.

This reconversion affects every known aspect, being, with no doubts, the construction sector and all of its subsectors the one that generates more environmental impacts. With this said, the commented sector, and moreover the concrete-cement one, needs a reorientation towards a policy of action headed to a sustainable development.

In order to do such thing, it is needed to influence reutilization and recycling strategies of materials that have completed their lifecycle, looking forward to achieve less repercussions over the environment and a reasonable consumption of these materials (cement) in order to lower the production costs and, furthermore, to lower the global CO2 emissions.

Because of all this; the motivation for this investigation: to study the effect of recycled aggregates in concrete (directly coming from concrete crushing) and, in other hand, to study a new mix proportioning method for recycled concrete based in the A.C.I. methodology, which reduces the cement consumption in the design stage.

In this study, several concrete types have been elaborated with equal water/cement ratios and same methodology (Bolomey) in order to make comparisons between them. One of the goals is to determine the most important mechanical properties through some tests (compressive strength, elasticity modulus). Additionally, other tests have been done in order to obtain some other important properties of the concrete (slump test, density…).

The obtained results in this experimental thesis are conclusive. The recycled concrete, with a 20% weight substitution of natural aggregates by recycled ones, is a good solution, due to the fact that it achieves similar mechanical properties to those of the conventional concrete and also because of the use of recycled materials.

By other hand, the equivalent mortar volume (E.M.V.) methodology offers great advantages when proportioning concretes because it combines the materials recycling with cement savings (less CO2 emissions and more economically sustainable).

Keywords: sustainability, concrete residues, recycled concrete, EMV method, cement consumption.

Agradecimientos

Esta tesis ha sido posible no sólo gracias al trabajo particular de un individuo, si no también gracias a la suma de esfuerzos de una serie de personas que con su voluntad de ayudarme, bien sea de una forma profesional o personal, me ha permitido desarrollar este estudio de una forma más amena.

Primero de todo quiero agradecer a mi tutora, Marilda Barra, la posibilidad que me brindó de poder realizar una tesina experimental con ella. Quiero valorar su capacidad de comunicación a la hora de comentar el estudio con ella, ya que en todo momento mostraba una proximidad y disponibilidad absoluta.

También me gustaría dar las gracias a toda la gente del departamento, tanto personal docente como doctorandos, ya que siempre que he necesitado algo, he tenido una respuesta positiva.

En concreto, agradezco a Diego, Sergi y a Eufronio que siempre han estado a mi lado cuando los he necesitado, ya que sin ellos los días de trabajo en el laboratorio habrían sido más complicados.

A mis padres y mi hermano, ya que siempre han confiado en mí y me han ayudado a ser la persona que soy ahora. A ellos, porque han sido tanto en los buenos momentos como en los malos, no sólo en la tesis si no durante toda la vida. Sin ellos hubiera sido muy difícil llegar hasta aquí.

Y finalmente, y en especial, a Cristián, ya que el tiempo es oro y si tuviera que pagar todo el tiempo que ha dedicado en ayudarme y guiarme a lo largo de la tesis, no tendría suficiente.

A todos ellos, muchas gracias.

Índice General

Capítulo 1. Introducción 1

1.0 Antecedentes 1
1.1 Objetivos 3
1.2 Metodología 4

Capítulo 2. Estado del Conocimiento 7

2.1 Introducción 7
2.2 Hormigón 7

2.2.1 Generalidades 7
2.2.2 Estructura del hormigón 8

2.2.2.1 Los áridos 9
2.2.2.2 Zona de transición 9
2.2.2.3 La pasta de cemento 10

2.2.3 Sostenibilidad en el hormigón 12

2.3 Dosificación 14

2.3.1 Generalidades 14
2.3.2 Métodos de dosificación para hormigones convencionales 14

2.3.2.1 Métodos de dosificación basados en el contenido de cemento 15

2.3.2.1.1 Método de Fuller 15
2.3.2.1.2 Método de Bolomey 17
2.3.2.1.3 Método de Faury 18

2.3.2.2 Métodos de dosificación basados en la resistencia a compresión 20

2.3.2.2.1 Método De La Peña 20
2.3.2.2.2 Método A.C.I. 22

2.4 Hormigón reciclado 24

2.4.1 Generalidades 24
2.4.2 Propiedades de los áridos reciclados 25

2.4.2.1 Mortero Adherido 25
2.4.2.2 Granulometría 25
2.4.2.3 Forma y textura 26
2.4.2.4 Densidad 27
2.4.2.5 Absorción 28
2.4.2.6 Contaminantes e impurezas 28

2.4.4 Propiedades del hormigón reciclado endurecido 30

2.4.4.1 Densidad seca 30
2.4.4.2 Resistencia a compresión 30
2.4.4.3 Módulo de elasticidad 32

2.4.5 Métodos de dosificación para hormigones reciclados 33

2.4.5.1 Método del mortero de volumen equivalente E.M.V. 33

2.5 Normativa actual sobre áridos reciclados 35

2.5.1 Generalidades 35

2.5.1.1 Estado actual en España 35
2.5.1.2 Estado actual en la Comunidad Europea 36

Capítulo 3. Fase experimental 41

3.1 Introducción 41
3.2 Caracterización de los materiales 41

3.2.1 Cemento 42
3.2.2 Agua 42
3.2.3 Árido convencional 43

3.2.3.1 Inspección visual 43
3.2.3.2 Densidad de partículas y el coeficiente de absorción 43

3.2.3.2.1 Método de la balanza hidrostática 44
3.2.3.2.1 Método del picnómetro 45

3.2.3.3 Determinación de la granulometría 48

3.2.4 Árido reciclado 49

3.2.4.1 Inspección visual 50
3.2.4.2 Densidad de partículas y el coeficiente de absorción 50
3.2.4.3 Determinación de la granulometría 50

3.2.5 Aditivos 50

3.3 Fabricación de los hormigones 51

3.3.1 Proceso de fabricación 51

3.3.1.1 Dosificación 52
3.3.1.2 Preparación de los materiales 52
3.3.1.3 Amasado 53
3.3.1.4 Llenado, compactación y conservación de probetas 54

3.3.2 Propiedades medidas 54

3.3.2.1 Hormigón fresco 56

3.3.2.1.1 Consistencia 56
3.3.2.1.2 Temperatura 56

.3.2.2 Hormigón endurecido 56

3.3.2.2.1 Propiedades físicas 56
3.3.2.2.2 Propiedades mecánicas 57

Capítulo 4. Resultados y discusiones **61**

4.1 Introducción 61
4.2 Caracterización de los materiales 61

4.2.1 Inspección visual 61

4.2.1.1 Árido convencional 61
4.2.1.2 Árido reciclado 62

4.2.2 Granulometría 62

4.2.2.1 Grava 63
4.2.2.2 Arena 64
4.2.2.3 Árido reciclado 65

4.2.3 Densidad de partículas y coeficiente de absorción 66

4.2.3.1 Grava 67
4.2.3.2 Arena 67
4.2.3.3 Árido reciclado 68

4.3 Dosificación 69

4.3.1 Hormigón convencional 70
4.3.2 Hormigón reciclado 72

4.3.2.1 Hormigón reciclado con un porcentaje de sustitución del 20% en peso de árido reciclado por árido grueso natural 72
4.3.2.2 Hormigón reciclado con un porcentaje de sustitución del 20% en peso de árido reciclado por árido grueso natural (adaptación método E.M.V.) 73

4.4 Hormigón fresco 76

4.4.1 Consistencia 76

4.4.1.1 Discusión de los resultados de consistencia 76

4.4.2 Temperatura 78

4.4.2.1 Discusión de los resultados de temperatura 78

4.5 Hormigón endurecido 79

4.5.1 Densidad 79

4.5.1.1 Discusión de los resultados de consistencia 80

4.5.2 Resistencia a compresión 82

4.5.2.1 Discusión de los resultados de resistencia a compresión 83

4.5.3 Módulo elástico 89

4.5.3.1 Discusión de los resultados de módulo elástico 90

4.6 Resumen de resultados 95

Capítulo 5. Conclusiones **97**

5.1 Introducción 97
5.2 Conclusiones generales 98
5.3 Conclusiones específicas 99

Capítulo 6. Futuras líneas de investigación **101**

Capítulo 7. Bibliografía **103**

Índice de tablas

Capítulo 2

Tabla 2.1 Tabla resumen de las especificaciones comentadas para los diferentes áridos [23] [52] [53] [54] 39

Capítulo 3

Tabla 3.1 Características del cemento CEM I 42,5 N/R 42
Tabla 3.2 Número de probetas por ensayo a realizar para cada tipo de hormigón 51
Tabla 3.3 Consistencias y formas de compactación [23] 55

Capítulo 4

Tabla 4.1 Granulometría Grava 63
Tabla 4.2 Granulometría Arena 64
Tabla 4.3 Granulometría Árido reciclado (AR-CJF) 65
Tabla 4.4 Densidad de partículas y coeficiente de absorción de la Grava 67
Tabla 4.5 Densidad de partículas y coeficiente de absorción de la Arena 68
Tabla 4.6 Densidad de partículas y coeficiente de absorción del Árido reciclado (AR-CJF) 69
Tabla 4.7 Dosificación hormigón convencional (20 litros por amasada) 70
Tabla 4.8 Dosificación hormigón reciclado con un 20% de sustitución en peso (20 litros por amasada) 72
Tabla 4.9 Dosificación hormigón reciclado EMV 20% de sustitución en peso (20 litros por amasada) 74
Tabla 4.10 Consistencias y aditivo añadido en los hormigones fabricados 76
Tabla 4.11 Peso de áridos en los diferentes hormigones de relación a/c 0,45 81
Tabla 4.12 Peso de áridos en los diferentes hormigones de relación a/c 0,60 82
Tabla 4.13 Resistencia de los hormigones con relación 0,45 tras 28 días en cámara húmeda 85
Tabla 4.14 Test de homogeneidad de varianzas para la resistencia a compresión en hormigones de relación agua/cemento 0,45 86
Tabla 4.15 Test Anova para la resistencia a compresión en hormigones de relación agua/cemento 0,45 86
Tabla 4.16 Resistencia de los hormigones con relación 0,60 tras 28 días en cámara húmeda 88
Tabla 4.17 Test de homogeneidad de varianzas para la resistencia en hormigones de relación agua/cemento 0,60 88
Tabla 4.18 Test Anova para la resistencia a compresión en hormigones de relación agua/cemento 0,60 88
Tabla 4.19 Módulo elástico de los hormigones con relación 0,45 tras 28 días en cámara húmeda 91
Tabla 4.20 Test de homogeneidad de varianzas para el módulo elástico en hormigones de relación agua/cemento 0,45 91
Tabla 4.21 Test de Anova para el módulo elástico en hormigones de relación agua/cemento 0,45 91
Tabla 4.22 Módulo elástico en los hormigones con relación 0,60 tras 28 días en cámara húmeda 93
Tabla 4.23 Test de homogeneidad de varianzas para el módulo elástico en hormigones de relación agua/cemento 0,60 93
Tabla 4.24 Test de Anova para el módulo elástico en hormigones de relación agua/cemento 0,60 93
Tabla 4.25 Resumen de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados 95

Índice de figuras

Capítulo 2

Figura 2.1 Esquema representativo de la zona de transición en la estructura del hormigón [9] 10
Figura 2.2 Pilares del desarrollo sostenible [10] 12
Figura 2.3 Ajuste granulométrico del árido compuesto a la curva de Fuller [7] 16
Figura 2.4 Ajuste granulométrico del árido compuesto a la curva de Bolomey [7] 18
Figura 2.5 Efecto pared [7] 19
Figura 2.6 Representación gráfica de la curva de Faury [7] (54) 20
Figura 2.7 Representación gráfica del método de De La Peña [7] 22
Figura 2.8 Relación entre la resistencia a compresión del hormigón original y el reciclado [44] 31
Figura 2.9 Reducción del módulo de elasticidad en hormigones reciclados [51] 33
Figura 2.10 Esquema del principal fundamento del método del volumen de mortero equivalente(E.M.V.) 34

Capítulo 3

Figura 3.1 Fase de preparación previa al ensayo 47
Figura 3.2 Fase de ensayo por el método del picnómetro 48
Figura 3.3 Fase de ensayo granulométrico 49
Figura 3.4 Fase de preparación de materiales 53
Figura 3.5 Fase de amasado del hormigón fabricado 54
Figura 3.6 Ensayo de consistencia del hormigón fresco 55
Figura 3.7 Determinación de la densidad sólida de los hormigones fabricados tras 28 días 57
Figura 3.8 Ensayo de módulo de elasticidad en compresión 59

Capítulo 4

Figura 4.1 Resultado del test visual correspondiente al árido reciclado AR-CJF 62
Figura 4.2 Curva granulométrica Grava 63
Figura 4.3 Curva granulométrica Arena 64
Figura 4.4 Curva granulométrica Árido reciclado (AR-CJF) 65
Figura 4.5 Ajuste granulométrico a la curva Bolomey por el método gráfico de los tanteos para el hormigón convencional con una relación agua/cemento 0,45 71
Figura 4.6 Ajuste granulométrico a la curva Bolomey por el método gráfico de los tanteos para el hormigón convencional con una relación agua/cemento 0,60 71
Figura 4.7 Ajuste granulométrico a la curva Bolomey por el método gráfico de los tanteos para el hormigón reciclado con una relación agua/cemento 0,45 73
Figura 4.8 Ajuste granulométrico a la curva Bolomey por el método gráfico de los tanteos para el hormigón reciclado con una relación agua/cemento 0,60 73
Figura 4.9 Ajuste granulométrico a la curva Bolomey por el método gráfico de los tanteos tras adaptar el método EMV para el hormigón reciclado con una relación agua/cemento 0,45 75
Figura 4.10 Ajuste granulométrico a la curva Bolomey por el método gráfico de los tanteos tras adaptar el método EMV para el hormigón reciclado con una relación agua/cemento 0,60 75

Figura 4.11 Asientos hormigón convencional (HC) 77
Figura 4.12 Asientos hormigón reciclado (20% sustitución en peso del árido natural) (HR 20%) 78
Figura 4.13 Asientos hormigón reciclado método EMV (HR EMV 20%) 78
Figura 4.14 Control de temperaturas 79
Figura 4.15 Densidad media hormigones con relación a/c 0,45 (kg/m3) 80
Figura 4.16 Densidad media hormigones con relación a/c 0,60 (kg/m3) 81
Figura 4.17 Resistencia compresión media hormigones con relación a/c 0,45 (MPa) 84
Figura 4.18 Gráfico Q-Q para la resistencia a compresión de los hormigones de relación agua/cemento 0,45 86
Figura 4.19 Resistencia compresión media hormigones con relación a/c 0,60 (MPa) 87
Figura 4.20 Gráfico Q-Q para la resistencia a compresión de los hormigones de relación agua/cemento 0,60 89
Figura 4.21 Módulo elástico medio hormigones con relación a/c 0,45 (GPa) 90
Figura 4.22 Gráfico Q-Q para el módulo elástico de los hormigones de relación agua/cemento 0,45 92
Figura 4.23 Módulo de deformación medio hormigones con relación a/c 0,60 (GPa) 92
Figura 4.24 Gráfico Q-Q para el módulo elástico de los hormigones de relación agua/cemento 0,60 94

Capítulo 1

Introducción

1.0 ANTECEDENTES

En los últimos tiempos, se oye con cierta asiduidad la palabra sostenibilidad y las repercusiones que conlleva sobre un área concreta o en un determinado espacio más o menos ficticio. Se entiende por sostenibilidad todo aquello que es susceptible de ser sostenido, es decir, a ser mantenido, constante, uniforme, consecutivo, perpetuo... [(1)]. En lo que se refiere al significado que se le está dando en las masivas tertulias, mítines y conferencias, el concepto se encamina sobre todo hacia la sostenibilidad ambiental, económica y social siendo los tres pilares básicos sobre los que se sustenta plenamente esta idea.

Un desarrollo sostenible busca un patrón de crecimiento que concilie el desarrollo económico, social y ambiental en una economía productiva y competitiva, que favorezca el empleo de calidad, la igualdad de oportunidades, y que garantice el respeto ambiental y el uso racional de los recursos naturales, de forma que permita satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro para atender sus propias necesidades. Esto acarrea una profunda reconversión de la situación económica actual, basada en la explotación de los recursos naturales, de manera que no repercuta en el entorno buscando una relación directa en la planificación sostenible del medio ambiente y la sostenibilidad económica.

Reconversión que afecta a todos los ámbitos y sectores siendo, sin ningún tipo de duda, el de la construcción, con todos los subsectores en los que influye, uno de los que genera un mayor impacto ambiental. Existen estudios [(2)] que corroboran que la práctica de esta actividad consume entre el 20% y el 50% de los recursos naturales produciendo además un gran número de residuos procedentes tanto del propio desarrollo de dicha actividad como de acciones derivadas de la misma. Gran parte de los residuos generados (20% según fuentes de la European Demolition Association) son procedentes de escombros del propio hormigón que es, como ya se sabe, el material por excelencia en la construcción y además el causante del 6,6% anual de emisiones totales de CO_2 (gas más importante de efecto invernadero en la problemática del cambio climático) generados por la industria cementera durante el proceso de fabricación del cemento (componente primordial del hormigón y segundo material más consumido en el planeta [(3)]).

Por todo esto, el sector de la construcción y más en concreto el del hormigón-cemento necesita reorientarse hacia una política de actuación dirigida hacia el desarrollo sostenible. Para ello, es preciso incidir en estrategias de reutilización y reciclaje de materiales que han cumplido su vida útil buscando una repercusión menor en el entorno y un consumo razonable de dicho material (cemento) para abaratar costes de producción y sobre todo reducir las emisiones antropogénicas de este gas a nivel global.

Esta política de reciclaje presenta grandes atractivos al ser su principal ventaja la de solucionar, a un mismo tiempo, la problemática originada por la eliminación de unos subproductos de desecho producidos y que, mediante el aprovechamiento de éstos, se obtiene una nueva materia prima con lo que se reduce la cantidad de recursos naturales primarios a extraer minimizando el número de explotaciones mineras necesarias para suministrar la materia prima original y, por lo tanto, reduciendo el impacto medioambiental al favorecer la protección de unos recursos naturales siempre limitados.

En apoyo a todo lo dicho, en España se están tomando ciertas medidas para buscar dicha sostenibilidad y motivo de ello es el REAL DECRETO 105/2008 aprobado en febrero de 2008 que regula la producción y gestión de residuos de la construcción al establecer un marco jurídico relacionado con la generación de residuos de la construcción y su demolición. De esta manera, se fomenta su prevención, reutilización y reciclado para buscar un desarrollo sostenible en esta actividad.

Enlazando con todo lo dicho, el hecho de utilizar materiales reciclados en la fabricación de mezclas y más concretamente provenientes de escombros del propio hormigón plantea un nuevo campo de investigación. Estudios muy recientes [(4)] han demostrado que, con el uso de este tipo de hormigones reciclados, se puede llegar a resistencias similares o incluso superiores a la de otros hormigones de características similares con menores cantidades de cemento en el producto final. Esto que parece ciencia ficción, es tan simple de entender si se considera que el árido reciclado que proviene de este tipo de desecho se compone básicamente de dos partes. Por un lado, los áridos gruesos que conforman la mezcla y, por el otro, la parte más fina de mortero que contiene una cierta cantidad de cemento adherido. Esta cantidad, hasta ahora no contada, significaría un cierto ahorro en el uso de este material a la hora de dosificar y hacer la mezcla final.

Si se corrobora esto último, supondría un cambio radical en la concepción y diseño actual de las mezclas de este tipo de hormigones. Junto a las ventajas ya comentadas de lo que supone el reciclado de materiales se produciría un ahorro en el uso de cemento lo que abarataría costes de producción y sobre todo reduciría las emisiones totales de CO_2. Aparentemente todo serían ventajas, no obstante esto generaría una gran controversia en la industria cementera. Un menor uso de este material supondría reducir los ingresos de una industria muy poderosa lo que bien seguro generaría grandes discusiones en el futuro.

Por todo ello el motivo de esta tesis: estudiar el efecto del reciclado en hormigones con desechos derivados del propio hormigón y, por otra parte, intentar corroborar los resultados que se desligan del estudio mencionado.

1.1 OBJETIVOS

OBJETIVOS GENERALES

Esta tesis tiene dos objetivos principales bien diferenciados y relacionados entre sí. Por un lado, pretende valorar los efectos en las propiedades mecánicas de mezclas con áridos reciclados procedentes de residuos del propio hormigón. Por el otro, busca analizar y adaptar el método de dosificación recientemente desarrollado con áridos reciclados (método del *Equivalent Morfar Volume* [5]) basado en el American Concrete Institute [6] a una de las metodologías más extendidas a nivel de enseñanza en el diseño de mezclas: el método de Bolomey [7] y, de esta manera, poder corroborar los resultados que se desprenden de dicha técnica desarrollada.

Todo ello, con el objetivo final de la puesta en práctica de una política de actuación dirigida hacia el desarrollo sostenible. Política que contempla el uso de materiales reciclados con un ahorro de costes de producción y de emisiones totales de CO_2 al reducir la cantidad en el uso de cemento en la mezcla. Reducción que no debe comprometer las propiedades mecánicas del producto final.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para conseguir los objetivos generales mencionados, será necesario estudiar las diferentes características del hormigón así como analizar la influencia de la variación de las propiedades del árido reciclado en el hormigón endurecido sobre todo a nivel mecánico (resistencia a compresión y módulo de elasticidad). Para ello, se fabricarán diversos tipos de hormigón reciclado y los resultados derivados de los ensayos mecánicos se compararán con los logrados en la fabricación de varios hormigones convencionales. Para el diseño de dichos hormigones, se evaluarán los diversos métodos de dosificación más utilizados con el fin de entender el funcionamiento final de las mezclas que se obtienen. De esta manera, se establecerá el concepto de dosificación a partir de los requisitos que se le exigen al hormigón en cada etapa de su vida.

Por otra parte, se analizará con detenimiento tanto el método del volumen de mortero equivalente (E.M.V.) que se basa en el A.C.I. como el de Bolomey buscando adaptar este último al primero. Se fabricarán varios hormigones reciclados con el resultado de esta adaptación y se compararán los datos resultantes de los ensayos mecánicos con los obtenidos de otros hormigones reciclados de características muy similares dosificados propiamente por el método puro de Bolomey. El objetivo será obtener resultados de igual o mejor resistencia mecánica y similares deformaciones elásticas con una menor cantidad de cemento utilizado. De esta manera se podrán o no corroborar los buenos resultados a los que se llega en el estudio mencionado.

Cabe destacar que todos los resultados que se obtendrán serán bajo las mismas condiciones de endurecimiento y se ensayarán a 28 días.

1.2 METODOLOGÍA

Para lograr los objetivos mencionados anteriormente, se han desarrollado una serie de trabajos que han servido para elaborar los distintos capítulos de los que consta esta tesis. A continuación, se describe brevemente la metodología que se ha seguido en cada uno de ellos.

En el segundo capítulo se aporta, fruto de una exhaustiva revisión bibliográfica en bases de datos de revistas científicas, libros, tesis, monografías y estudios anteriores, una visión general sobre los principales temas a los que hace referencia esta tesis. Dicho capítulo se puede dividir en 4 grandes bloques. Por un lado, se pretende dar una idea general de lo que significa el hormigón en la actualidad así como las políticas que se están adoptando para conseguir lo que puede denominarse como construcción sostenible. Para lograr dicha sostenibilidad, se hace especial hincapié en el uso del reciclado de áridos procedentes de residuos del propio hormigón. Es por esto que se destina otro de los bloques del capítulo a este aspecto ampliándose a las propiedades que se logran en los hormigones reciclados con el uso de los áridos indicados. La utilización de éstos no sería posible sin un conocimiento previo de los métodos de dosificación en el diseño de mezclas. De esta manera, otra de las partes de este segundo capítulo hace especial mención a los métodos de dosificación más comunes en la actualidad extendiéndolos al uso en hormigones reciclados. Es en este punto donde aparece otro de los principales aspectos tratados en esta tesis: el método E.M.V. que se caracteriza porque pretende buscar una reducción del consumo de cemento de tal manera que se produzca un menor impacto ecológico y económico. Por último, en el bloque restante, se incluye un resumen de las principales recomendaciones a nivel europeo y los requerimientos de la normativa española con respecto a los hormigones reciclados y su uso.

Presentado el estado del conocimiento, en el capítulo 3 se realiza un completo estudio de la fase experimental llevada a cabo y su metodología. Antes de la fabricación de los hormigones, se determinan las características de aquellos materiales que han sido necesarios para llevar a cabo este estudio. De esta manera, se han realizado diversos ensayos de granulometría, densitometría y de inspección visual. A partir de este punto, se describen los métodos que se han empleado en el diseño de las mezclas y se justifica su uso. Para ello, se establece el criterio de dosificación que, basado en la consecución de hormigones resistentes, tiene como objetivo primordial obtener un hormigón compacto y trabajable. Tras esto, se han fabricado dichas mezclas obteniendo diversos tipos de hormigones que se han ensayado mecánicamente bajo unas mismas condiciones.

De los datos prácticos desprendidos de los ensayos, en el capítulo 4, se realiza su análisis y se discuten sus resultados, a partir de los cuales se obtienen unas conclusiones finales. De este modo, se comparan los resultados de los varios tipos de mezclas fabricadas y se comprueban si los valores esperados se han cumplido finalmente.

En el capítulo 5, se presentan las conclusiones derivadas de los distintos trabajos realizados. Éstas se exponen en forma de unas conclusiones generales que responden a los objetivos principales propuestos y de unas conclusiones específicas que obedecen a diferentes aspectos concretos de los trabajos desarrollados.

En el capítulo 6, se describen algunas posibles futuras vías de investigación que se relacionan directa o indirectamente con esta tesis.

Finalmente, en el apartado de bibliografía (capítulo 7) se recogen las referencias más significativas utilizadas en el transcurso del trabajo realizado.

Capítulo 2

Estado del conocimiento

2.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se aporta una visión general sobre los principales temas a los que hace referencia esta tesis. Dicho capítulo se puede dividir en 4 grandes bloques. Por un lado, se pretende dar una idea general de lo que significa el hormigón en la actualidad así como las políticas que se están adoptando para conseguir lo que puede denominarse como construcción sostenible. Para lograr dicha sostenibilidad, se hace especial hincapié en el uso del reciclado de áridos procedentes de residuos del propio hormigón. Es por esto que se destina otro de los bloques del capítulo a este aspecto ampliándose a las propiedades que se logran en los hormigones reciclados con el uso de los áridos indicados. La utilización de éstos no sería posible sin un conocimiento previo de los métodos de dosificación en el diseño de mezclas. De esta manera, otra de las partes de este segundo capítulo hace especial mención a los métodos de dosificación más comunes en la actualidad extendiéndolos al uso en hormigones reciclados. Es en este punto donde aparece otro de los principales aspectos tratados en esta tesis: el método E.M.V. que se caracteriza porque pretende buscar una reducción del consumo de cemento de tal manera que se produzca un menor impacto ecológico y económico. Por último, en el bloque restante, se incluye un resumen de las principales recomendaciones a nivel europeo y los requerimientos de la normativa española con respecto a los hormigones reciclados y su uso.

2.2 HORMIGÓN

2.2.1 Generalidades

El hormigón es el material de construcción más empleado en el mundo (se estima una producción anual de 1,5 m^3 por habitante del planeta [8]), y tras el agua, es el producto más consumido en la tierra. Cada año, la industria del hormigón emplea 1.6 billones de toneladas de cemento, 10 billones de toneladas de roca y arena y un billón de toneladas de agua. Cada tonelada de cemento, requiere 1.5 toneladas de roca caliza así como del consumo de combustibles fósiles.

La gran popularidad del hormigón se debe a sus excelentes características, ofrece una buena resistencia a compresión, un buen comportamiento a fatiga, una excelente resistencia al agua, un buen comportamiento frente al fuego y requiere un bajo coste de mantenimiento. Las estructuras de hormigón y hormigón armado son competitivas cuando se comparan con otros materiales como las estructuras metálicas, no sólo por sus costos iniciales, sino incluyendo las necesidades de mantenimientos y reparaciones.

Sin embargo, su uso también acarrea unos grandes costes medioambientales, destacando particularmente, la enorme cantidad de energía consumida y CO_2 liberado durante su fabricación (sobre todo en el proceso de producción de uno de sus principales componentes: el cemento). Además, la obtención de áridos y materias primas necesarias para la obtención del cemento, puede implicar la destrucción de ciertos hábitats así como causar problemas de contaminación en el aire y agua de la zona.

2.2.2 Estructura del hormigón

El hormigón puede definirse como el material resultante de una mezcla íntima y homogénea de áridos finos, áridos gruesos, un aglomerante y agua en las debidas proporciones para que pueda fraguar y endurecer de manera óptima. Además, en el momento de su amasado, puede añadírsele otros productos o materiales para mejorar alguna de sus características.

La estructura del producto generado es heterogenia por lo que resulta muy difícil enunciar modelos que puedan predecir su comportamiento. Por ello, el conocimiento de la estructura y propiedades de los componentes individuales del hormigón son un útil ejercicio para el estudio de este material. Así, las principales características de la estructura del hormigón, se pueden resumir de la siguiente forma:

- Se distinguen tres fases: el árido grueso, la pasta de cemento endurecida y la zona de transición, que no es otra cosa que la región comprendida entre el árido grueso y la pasta de cemento endurecida. Dicha zona, de corteza delgada de 10 a 50 μm de espesor alrededor del árido grueso, generalmente, es más débil que los otros dos componentes del hormigón y que, por ello, ejerce una gran influencia en el comportamiento mecánico del mismo.

- Cada una de las tres fases es en sí misma multifase. Por un lado, tanto la zona de transición como la matriz de la pasta de cemento endurecida contienen una distribución heterogénea de diferentes tipos y cantidades de fases sólidas, poros y microfisuras y, por otro, cada partícula de árido puede presentar en su composición varios minerales además de microfisuras y poros.

- A diferencia de otros materiales de ingeniería, la estructura del hormigón no permanece estable. Tanto la pasta de cemento endurecida como la zona de transición están sujetas a cambios en el tiempo, propiciados por la humedad ambiente y la temperatura.

2.2.2.1 Los áridos

Los áridos ocupan entorno al 60-80% del volumen del hormigón. Es lógico, entonces, que sus características influyan en su estructura y, por lo tanto, en sus propiedades; sobre todo, en la densidad, en las propiedades elásticas y en la deformabilidad. Así, no parece totalmente adecuado considerar que el árido es un componente inerte del hormigón, pues desempeña un papel económico y técnico muy importante en las características de este material.

En general, las propiedades de los áridos que tienen mayor interés son las físicas:

1. La resistencia a compresión, la resistencia a la abrasión y el módulo de elasticidad (influye notablemente sobre el módulo de deformación del hormigón), función en buena medida de su porosidad.

2. La forma, el tamaño y la fracción volumétrica (gran influencia en la trabajabilidad del hormigón fresco y en la resistencia del hormigón endurecido).

3. La textura superficial (influye en la unión del árido y la pasta de cemento así como en la demanda de agua de la mezcla).

2.2.2.2 La zona de transición

La microestructura de la pasta de cemento endurecida próxima a la superficie de los áridos es distinta a la que se presenta en una distancia algo mayor de la interfaz árido-pasta; esta región constituye la zona de transición. Su espesor dependerá de diversas variables, pero es, como máximo, de unas 50 μm [9]. En general, se caracteriza por tener una mayor porosidad, con poros de mayor tamaño y un mayor contenido y tamaño de los cristales de portlandita $Ca(OH)_2$.

Básicamente, existen dos causas que explican la génesis de la zona de transición, ambas independientes de la exudación interna de agua.

1. En primer lugar, el efecto pared de los áridos, que provoca que la organización de las partículas de cemento sea menos densa cerca de los áridos y que conduce a la existencia de un gradiente en la relación agua/cemento y en consecuencia, de la porosidad y de la diferencia de la movilidad de los iones. La alta relación agua/cemento, fruto de la formación de una película de agua alrededor de los áridos gruesos, provoca una cierta movilidad de iones que desarrolla productos cristalinos (etringita e hidróxido cálcico) que forman grandes cristales creando un entramado más poroso que en la fase de pasta de cemento endurecida.

2. El segundo lugar, el desarrollo asimétrico de la hidratación, que sólo se produce desde las partículas de cemento y, obviamente, no desde la superficie de los áridos.

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

Con el aumento del tiempo de hidratación, la resistencia de la zona de transición puede llegar a ser incluso mayor que la del mismo mortero. Esto puede suceder como resultado de la cristalización de nuevos productos en el espacio de la zona de transición al producirse reacciones químicas lentas entre los constituyentes de la pasta y el árido.

A continuación se muestra en la figura 2.1 un esquema representativo de la zona de transición en la estructura del hormigón:

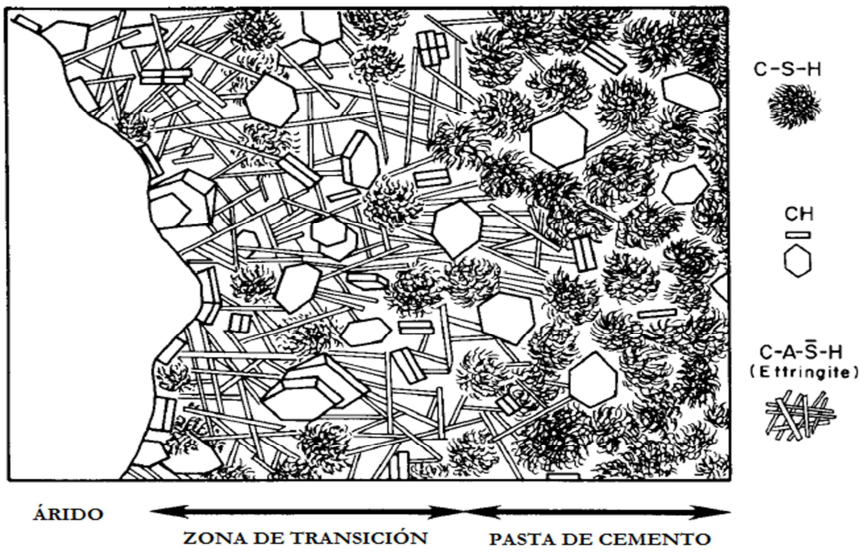


Figura 2.1 Esquema representativo de la zona de transición en la estructura del hormigón [9]

2.2.2.3 La pasta de cemento

En la mayoría de hormigones convencionales, esta fase está formada por agua y cemento portland. Este conglomerante hidráulico, y sus derivados, son los más empleados en la construcción debido a estar formados esencialmente por materiales muy abundantes en la naturaleza y ser su precio relativamente bajo en comparación con otros. La estructura de la pasta de cemento que se forma cuando se hidrata con agua se compone de varias fases sólidas presentes como de la presencia de varios tipos de huecos.

Los tipos, cantidades y características de las cuatro principales fases sólidas presentes son [7]:

1. Silicato cálcico hidratado (C-S-H): Esta fase supone el 50-60% del volumen total de sólidos en una pasta de cemento portland hidratada y es la que dota de una mayor cantidad de resistencia a la estructura por lo que es muy importante para determinar las propiedades de la pasta.

2. Hidróxido cálcico $Ca(OH)_2$: los cristales de hidróxido cálcico (también llamados portlandita) constituyen el 20-25% del volumen total de sólidos en la pasta hidratada. En comparación con el C-S-H, la capacidad de contribución a la resistencia del hidróxido cálcico queda limitada, como resultado de una zona superficial considerablemente menor.

3. Sulfoaluminatos cálcicos hidratados (etringita y monosulfatos): estos compuestos ocupan del 15 al 20% del volumen total de sólidos en la pasta de cemento hidratada y por lo tanto juegan sólo un pequeño papel en la relación entre estructura y propiedades resultantes. La presencia de monosulfatos en el cemento portland hace al hormigón vulnerable a los ataques de sulfatos.

4. Partículas de clinker no hidratadas: en función de la distribución de tamaño de las partículas del cemento anhidro (en general, abarca tamaños de 1 a 50 μm) y del grado de hidratación se pueden encontrar algunas partículas de clinker no hidratadas en la microestructura de la pasta de cemento hidratada, incluso mucho tiempo después de la hidratación.

Además de las fases sólidas descritas, la pasta de cemento hidratada contiene varios tipos de huecos que tienen una gran influencia en las propiedades de la misma y en el hormigón que resulta. El tamaño de los poros de la pasta de cemento abarca un rango de varios órdenes de magnitud, lo que permite clasificarlos, según su origen y características, en: poros de compactación, poros de aire ocluido, poros capilares y poros de gel.

Los microporos son demasiado pequeños como para tener un efecto adverso en la resistencia y permeabilidad de la pasta de cemento hidratada. Por el contrario, los poros capilares, sobre todo los mayores de 0,05 μm, resultan perjudiciales para la resistencia e impermeabilidad de la pasta de cemento, del mismo modo que los macroporos (burbujas introducidas y aire atrapado durante la mezcla).

Las características deseables en el hormigón endurecido: resistencia, estabilidad dimensional y durabilidad, estarán influenciadas por la proporción de pasta de cemento presente y sus propiedades, las cuales dependerán de las características de su microestructura.

2.2.3 Sostenibilidad en el hormigón

Como ya se ha mencionado, el sector de la construcción y más en concreto el del hormigón-cemento acarrea unos grandes costes medioambientales que repercuten seriamente en el entorno. Por ello, dicho sector necesita reorientarse hacia una política de actuación dirigida hacia el desarrollo sostenible que se basa en una sostenibilidad ambiental, económica y social siendo los tres pilares básicos sobre los que se sustenta plenamente esta idea (figura 2.2).

De esta manera, un desarrollo sostenible atiende al menester de satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro para atender sus propias necesidades.

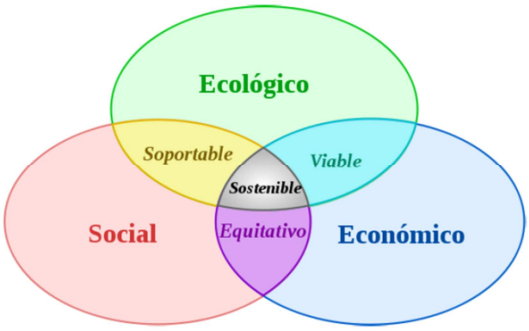


Figura 2.2 Pilares del desarrollo sostenible (10)

La justificación del desarrollo sostenible proviene tanto del hecho de tener unos recursos naturales limitados susceptibles de agotarse, como de que una creciente actividad económica sin más criterio que el económico produce, tanto a escala local como planetaria, graves problemas medioambientales que pueden llegar a ser irreversibles.

La reducción en la utilización de los recursos disponibles se llevará a cabo a través de la reutilización, el reciclaje, la utilización de recursos renovables y un uso eficiente de los recursos. Se tratará de incrementar la vida de los productos utilizados, un incremento en la eficiencia energética y del agua, así como un uso multifuncional del terreno.

Es por eso que es preciso incidir en estrategias de reutilización y reciclaje de materiales que han cumplido su vida útil buscando una repercusión menor en el entorno. Por otro lado, se ha de insistir en consumos razonables de cemento para abaratar costes de producción y sobre todo reducir las emisiones de CO_2, principal gas productor del efecto invernadero y cambio climático a nivel global.

El uso de materiales reciclados aporta grandes beneficios medioambientales. Por un lado, evita la necesidad de obtener, producir o explotar materiales naturales (con el correspondiente impacto ambiental que esto supone) mientras que además, da solución a los vertidos de material de desecho, como pueden ser los procedentes de demoliciones, cuya reincorporación al medio suele suponer un gran impacto ambiental. Además, dado el bajo coste de estos materiales, el resultado obtenido puede ser incluso más económico que el procedente del uso de áridos naturales. A parte de los restos de demoliciones, también pueden ser empleados como áridos (tanto finos como gruesos), ladrillos, escorias de alto horno, cristal, plásticos granulados, desechos de fibra de vidrio, maderas mineralizadas, etc. Como contraprestación, se debe destacar que cada tipo de árido reciclado, puede ofrecer características muy dispares, en cuanto a demanda de agua, resistencia mecánica, resistencia a agentes químicos, reactividad con otros componentes de la mezcla, etc. Por ello, es difícil estandarizar unas características comunes para el hormigón producido con árido reciclado.

Por otro lado, dado que una buena porción de los impactos que el hormigón produce son debidos a la utilización del cemento, es lógico pensar que, una reducción en el empleo de éste, es un gran paso para alcanzar lo que hoy en día se conoce como "hormigón verde".

El cemento es el principal componente del hormigón, ya que es precisamente el encargado de unir todos los demás componentes en una masa resistente y uniforme. No obstante, también es el componente que mayor impacto ecológico produce sobre el medio ambiente y el elemento que genera un mayor coste económico sobre el precio final del producto. El sector cementero es el responsable del 6,6% anual de emisiones totales de CO_2. Principalmente, durante su fabricación, se produce CO_2 a través de la conversión química de la piedra caliza producida durante su calcinación y mediante el propio consumo de combustibles fósiles. Además, a nivel de consumo energético, es la industria que soporta el mayor ratio de intensidad de energía por dólar de producto obtenido [10] provocando que, por ejemplo, su coste sea 10 veces más caro que el de los áridos (otro de los principales componentes del hormigón).

Actualmente, las estrategias que se siguen para lograr la tarea de reducir su consumo se centran sobre todo en dos partes. Por una parte, se intenta reducir la cantidad de cemento a través de un buen diseño de las mezclas de hormigón y por la otra, se sustituye parte de éste por alternativas como las puzolanas industriales o subproductos como las cenizas volantes, humo de sílice y escorias.

Es en este primer punto, junto a la consideración del reciclado de materiales en hormigones, donde esta tesis presta cierta atención como se podrá ver en adelante con el método del volumen de mortero equivalente (E.M.V.). Dicho método pretende, bajo la premisa de no comprometer las características mecánicas del producto final, reducir el impacto medioambiental de los hormigones con material reciclado fabricados así como reducir los costes económicos en su producción lo que genera grandes beneficios sociales.

La consideración de desarrollar mezclas con material reciclado con un menor gasto de cemento supone un cambio conceptual que acerca en mayor medida a lo que se conoce hoy en día como construcción sostenible, término al que se le asocian tres verbos de gran importancia ambiental: reducir, conservar y mantener.

2.3 DOSIFICACIÓN

2.3.1 Generalidades

Se entiende como dosificación, o diseño de mezclas de hormigón, al proceso por el cual se obtiene la correcta combinación de elementos que conforman el hormigón con el fin de producir un producto conforme a unas determinadas especificaciones [7]. Uno de los principales objetivos de este proceso es la obtención de un producto que se comportará según algunos requisitos predeterminados, siendo los más importantes, en general, la trabajabilidad del hormigón fresco, la resistencia alcanzada por el hormigón endurecido a una edad determinada y la durabilidad de este hormigón. Asimismo, otro de los propósitos de la dosificación es la producción de una mezcla que cumpla con todos estos requerimientos al menor coste posible.

2.3.2 Métodos de dosificación para hormigones convencionales

Actualmente, en la literatura mundial existen numerosos métodos analíticos, así como otros de carácter práctico, para determinar el diseño óptimo de las mezclas de hormigón. El hecho de que un gran número de autores se haya ocupado y se ocupen de esta cuestión, demuestra que todavía no se ha logrado obtener una solución definitiva a dicho asunto. No obstante, es importante realizar un estudio de los métodos de dosificación más significativos como primer paso para dominar el arte de dosificar.

Generalmente, los métodos de dosificación pueden dividirse en dos grandes grupos fundamentales [7]. El primero, formado por los que tienen como dato principal de partida la dosificación de cemento, teniendo además en cuenta otras características como pueden ser la consistencia, tamaño máximo del árido a emplear, aire ocluido en determinadas proporciones, clase de ambiente, etc.; y el otro, formado por los que se basan en las resistencias mecánicas del hormigón, especialmente la de compresión y a la que deben acompañar otros datos como los indicados anteriormente. Estos últimos son muy empleados debido a que, en muchos hormigones, y especialmente en los estructurales, la resistencia a compresión es la característica fundamental que se trata de conseguir

Aunque son numerosos los métodos que existen en la bibliografía para dosificar cuando se conoce la cantidad de cemento a emplear, a continuación, se van a considerar tres de los que tal vez sean los más utilizados a nivel de enseñanza: el método de Fuller, el de Bolomey y el de Faury. Es importante decir, que su aplicación dependerá de cada caso concreto planteado, siendo, por otra parte, cada uno de ellos una perfección del anterior.

Por otra parte, en el caso de los métodos de dosificación que tienen como finalidad encontrar las proporciones en que hay que mezclar a los componentes para conseguir un hormigón con una resistencia a compresión determinada, se describirán solamente De La Peña y el American Concrete Institute (A.C.I.) por ser probablemente los más empleados a nivel mundial.

2.3.2.1 Métodos de dosificación basados en el contenido de cemento

2.3.2.1.1 Método de Fuller

El método de Fuller, desarrollado en 1907 en los Estados Unidos, es una de las técnicas más clásicas y de fácil aplicación en el diseño de mezclas cuando se parte de una cantidad fija de cemento conocida. Su aplicación es muy indicada para obras de hormigón en las que el tamaño máximo del árido está comprendido entre 50 ± 20 mm, los áridos son rodados, la cantidad de cemento no es inferior a 300 kg/m^3 y no existen secciones fuertemente armadas.

El método parte como dato fundamental de la *cantidad de cemento* real por metro cúbico de hormigón a fabricar. A partir de aquí, se establece la cantidad de agua necesaria de acuerdo con el tipo de árido a utilizar, su tamaño máximo y la consistencia deseada (dependerá de cada caso concreto). A efectos de aplicación, para determinar el *tamaño máximo del árido*, se considerará aquel tamaño máximo de abertura del menor tamiz que retiene menos del 25% al cribar por él, el material disponible. Conocido dicho tamaño, mediante el uso de una tabla base en función del tipo de árido y de su tamaño máximo, se establecerá la *cantidad de agua* por metro cúbico de hormigón. Es importante destacar que los valores de dicha tabla, corresponden a ensayos experimentales de hormigones con relación agua/cemento 0,57 en peso y con una consistencia blanda. Si el hormigón a fabricar difiere de dichas condiciones, será necesario modificar los valores que proporciona la tabla según unas correcciones que se indican en una segunda tabla.

Conocida la cantidad de agua a utilizar, el objetivo será determinar las *proporciones en que se deben mezclar los distintos áridos* de los que se disponen. Con este fin, el método de Fuller dispone de una curva de referencia cuya granulometría se consideró, según su autor, 'ideal' a la hora de obtener un esqueleto granular compacto, requisito imprescindible en el intento de obtener un buen hormigón. Dicha curva viene definida por la siguiente expresión:

$$y = 100\sqrt{\frac{d}{D}}$$

donde *y* es el tanto por ciento en volumen que pasa por cada tamiz de abertura *d*, *d* es la abertura de cada uno de los tamices de la serie empleada (mm) y *D* es el tamaño máximo del árido (mm).

Para realizar el *ajuste granulométrico* de la mezcla de los diferentes áridos a la curva de Fuller, o parábola de Gessner, puede emplearse un sistema de tanteos o uno basado en los módulos granulométricos o de finura (cuando se emplea la serie de tamices americana ASTM).

1. El *método de los tanteos*, es un tipo de resolución gráfica. Para que la curva de la composición de los áridos se ajuste de la mejor manera a la de Fuller han de realizarse una serie de tanteos hasta que las áreas por encima y por debajo de la curva de referencia queden compensadas.

Este procedimiento resulta bastante cómodo, rápido y, con un poco de práctica, suelen hacer falta pocos tanteos para lograr que la curva de composición se ciña lo mejor posible a la curva de referencia.

2. Por otro lado, la resolución numérica del método de Fuller tiene la ventaja de ser más exacta que la anterior. La idea es obtener una mezcla que tenga el mismo *módulo granulométrico* que la curva de referencia; para ello, en primer lugar se calculan los módulos granulométricos de las *n* fracciones que componen el árido y, a continuación, los módulos granulométricos de las curvas de Fuller cuyos tamaños máximos coinciden con los de las fracciones *2,3,...,n*. A partir de aquí, se plantea un sistema de *n* ecuaciones con *n* incógnitas que serán los tantos por ciento que se debe emplear para que la granulometría de la mezcla se ajuste a la curva de referencia.

A continuación, en la figura 2.3 se muestra un ejemplo de ajuste granulométrico a la curva de Fuller.

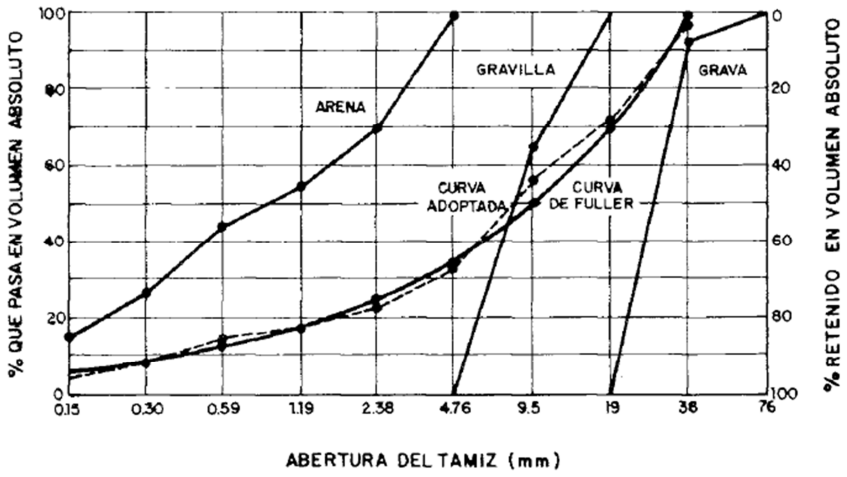


Figura 2.3 Ajuste granulométrico del árido compuesto a la curva de Fuller[7]

Tras obtener la proporción en que se han de mezclar las distintas fracciones de los áridos, se determina la *dosificación por metro cúbico*, partiendo de la base que la suma de los volúmenes relativos de los componentes será igual al volumen del hormigón obtenido.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que el volumen de la pasta de cemento es algo menor que la suma de los volúmenes del cemento y del agua; esta contracción y reducción de volumen (incluyendo pérdidas) del hormigón fresco y bajo criterios prácticos, se suele asumir alrededor de un 2,5%, por lo que resulta necesario considerar que, para obtener un metro cúbico de hormigón, es preciso mezclar 1.025 dm^3 de componentes. De esta manera, se debe restar de los 1.025 dm^3 los volúmenes de agua y cemento, anteriormente hallados; el resto será el volumen relativo de los áridos, que habrá que repartir entre las distintas fracciones en la proporción determinada con anterioridad.

Para obtener los *pesos de cada elemento* que compondrá el hormigón, se deberá multiplicar los volúmenes relativos por sus densidades correspondientes.

2.3.2.1.2 Método de Bolomey

Este método, desarrollado en el año 1926 en Francia, puede considerarse como una extensión de la técnica de Fuller siendo muy útil para el diseño de hormigones en masa cuando se conoce el tipo, granulometría y tamaño máximo del árido a utilizar y el sistema de compactación que se va a usar.

El desarrollo del método de Bolomey es exactamente igual al del método de Fuller. Conocida la cantidad de cemento a emplear, y siguiendo el mismo criterio que el utilizado en el método anterior, se establece el *tamaño máximo de árido* del que se dispone. A continuación se determina la *cantidad de agua* necesaria por metro cúbico de hormigón siguiendo las mismas directrices que en el caso anterior.

A partir de aquí, para determinar las distintas fracciones de los áridos que se disponen, Bolomey es donde introduce una serie de modificaciones respecto al método ya comentado. Bolomey utiliza una *curva de referencia de granulometría variable* en función de la consistencia deseada en el hormigón y la forma de los áridos (además sigue teniendo en cuenta el tamaño máximo de árido). Ésta viene definida por

$$y = a + (100 - a)\sqrt{\frac{d}{D}}$$

donde *y* es el tanto por ciento en volumen que pasa por cada tamiz de abertura *d*, *d* es la abertura de cada uno de los tamices de la serie empleada (mm), *D* es el tamaño máximo del árido (mm) y *a* es un parámetro que toma distintos valores en función del tipo de árido y la consistencia deseada en el hormigón a fabricar.

Los valores del parámetro *a* se deben consultar en una tabla en la que se puede observar que a medida que disminuye la consistencia deseada del hormigón también lo hace los valores de *a*. Dicho parámetro también depende del tipo de árido del que se dispone siendo mayor para áridos machacados que para áridos rodados.

A continuación, y de la misma manera que Fuller, para realizar el *ajuste granulométrico* de la mezcla de los áridos a la curva tomada como referencia puede emplearse un sistema de tanteos, o uno teórico que se basa en los módulos granulométricos.

1. El *método de los tanteos*, no varía respecto al comentado anteriormente.

2. La *resolución numérica* es idéntica a la explicada en Fuller. No obstante, se deben hacer tres observaciones. Una de las incógnitas del sistema ya se conoce al ser la cantidad de cemento y saber por tanto el tanto por ciento de la fracción que se debe emplear. Por otro lado, se considera que el módulo granulométrico del cemento es cero. Por último, las curvas granulométricas que se utilizan para obtener los módulos granulométricos teóricos no son realmente las curvas de Bolomey para los distintos tamaños de árido, sino una modificación de ellas.

A continuación, en la figura 2.4 se muestra un ejemplo de ajuste granulométrico a la curva de Bolomey.

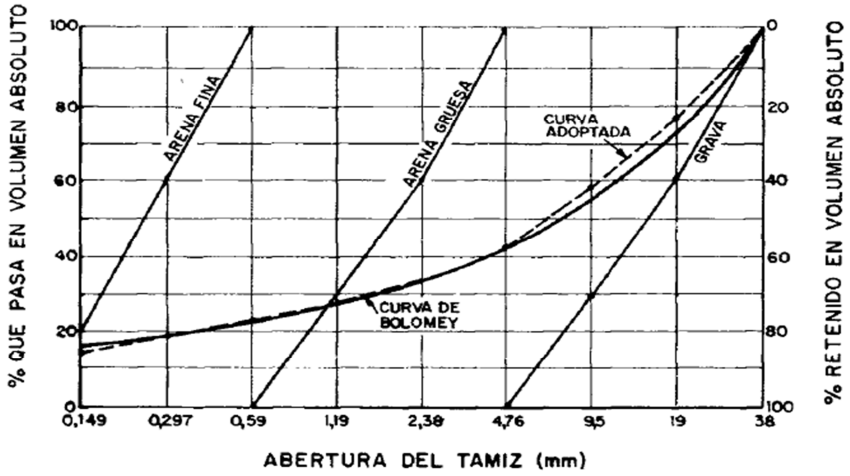


Figura 2.4 Ajuste granulométrico del árido compuesto a la curva de Bolomey Figura [7]

Tras obtener la proporción en que se han de mezclar las distintas fracciones de los áridos, se determina la *dosificación por metro cúbico*, para ello se utiliza la misma metodología descrita en el método de Fuller.

2.3.2.1.3 Método de Faury

El método de Faury, presentado en 1944 en Francia, se puede considerar otra extensión de los dos métodos ya mencionados. Éste se basa en las experiencias realizadas por su propio autor, las que constituyen una continuación de las que ya anteriormente habían ejecutado sobre principios similares otros investigadores tales como Fuller, Bolomey y principalmente Caquot. Este procedimiento, se caracteriza por introducir una serie de mejoras respecto a los anteriores convirtiéndolo en idóneo para todo tipo de hormigones: en masa, armados y, especialmente, en los destinados a piezas prefabricadas.

Fundamentalmente, el método se basa en el criterio denominado *efecto de pared*, desarrollado por el investigador francés Caquot, que cuantifica el efecto que una superficie dura ejerce sobre la porosidad de un material granular en la zona adyacente a ella. Dicho efecto se define como la relación existente entre el tamaño máximo del árido *D* y el radio medio del molde *R*, es decir, *D*/*R*. Esto hace que el método de Faury, como ya se ha indicado, sea especialmente adecuado en la construcción de piezas prefabricadas en las que predomina la superficie del molde sobre su volumen, es decir, en aquellas piezas en las que el efecto pared tiene un valor importante.

Para definir el *tamaño máximo del árido D*, el método considera dicha dimensión como el diámetro suficiente de los orificios del tamiz que deja pasar todo el árido. El valor de *D* puede calcularse convencionalmente por la siguiente relación:

$$D = d_1 + (d_1 - d_2)\frac{x}{y}$$

donde d_1 es el mayor de los tamices sobre el que quedan como residuo los granos más gruesos de la grava, d_2 el tamiz inmediatamente inferior y la relación entre ambos en progresión geométrica de razón de 2 ($d_2 = d_1/2$), x la proporción de granos de dimensiones superiores a d_1 e y la proporción de granos comprendidos entre d_1 y d_2 retenidos, por tanto, en el tamiz d_2.

Para determinar el radio medio de moldaje *R,* es necesario calcular la relación existente entre el volumen y la superficie del molde definido por:

$$R = \frac{Volumen\ elemento}{Superficie\ (moldaje + armadura)}$$

El efecto pared considera (figura 2.5) que, al existir las paredes del molde *aa'* y las armaduras, los áridos gruesos se encuentran impedidos de entrar en los huecos que dejan entre sí los del mismo tamaño. En consecuencia, se requiere una mayor cantidad de árido fino que en el caso en que el molde tuviese por pared *bb'*, con lo cual para un contenido de cemento determinado se obtendrán resistencias más bajas.

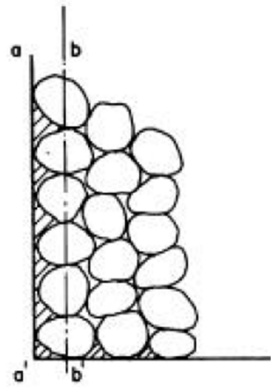


Figura 2.5 Efecto pared [7]

De esta manera, el tamaño máximo de árido *D* a emplear para una pieza determinada de radio medio *R* debe cumplir con:

$$0{,}8 < \frac{D}{R} < 1{,}0$$

Determinado ya el tamaño máximo del árido en función del radio medio de la pieza que se va a fabricar, el siguiente objetivo será hallar el *volumen de huecos* que existe entre los distintos granos de árido y de cemento. La experiencia demuestra que este volumen depende de la consistencia de la mezcla, de la naturaleza de los áridos, de su tamaño máximo y de la potencia de compactación, de manera que se puede saber el porcentaje de huecos en cada hormigón mediante la expresión (que tiene en cuenta el efecto pared) deducida experimentalmente que se muestra a continuación:

$$h = \frac{K}{\sqrt[5]{D}} + \frac{K'}{\frac{R}{D} - 0{,}075}$$

donde *h* es el porcentaje unitario de huecos, *K* y *K'* son coeficientes experimentales que deben ser elegidos principalmente en fundición de la consistencia deseada y la naturaleza de los áridos.

Tras encontrar el porcentaje de huecos, se debe determinar la *cantidad de agua* a emplear en el hormigón. Para ello se multiplica la proporción de huecos por mil para obtener los litros de agua necesarios para amasar un metro cúbico de hormigón. En el caso de que el hormigón contenga aire incorporado, al volumen de huecos se le deber restar el volumen de aire para obtener la cantidad de agua.

Después de todo esto, se establece el *porcentaje de los áridos* con el que debe configurarse la mezcla. Para ello el método propone una *curva granulométrica de referencia* o *curva ideal*, la que incluye al cemento, que puede ser variada de acuerdo a las características que se desee conferir al hormigón.

Dicha curva está formada por dos rectas de diferente pendiente de acuerdo con los dos tipos de áridos que considera (un conjunto de granos finos y medios de 0 a *D/2* y una parte de granos gruesos de *D/2* a *D*). Estos dos segmentos se cortan en un punto, de abscisa (abertura de los tamices en escala proporcional a las raíces quintas de estas aberturas) *D*/2, cuya ordenada (tanto por ciento que pasa en volumen absoluto) depende de *D*, de la forma de los granos del árido, de la potencia de compactación y del efecto pared, *D*/*R* .

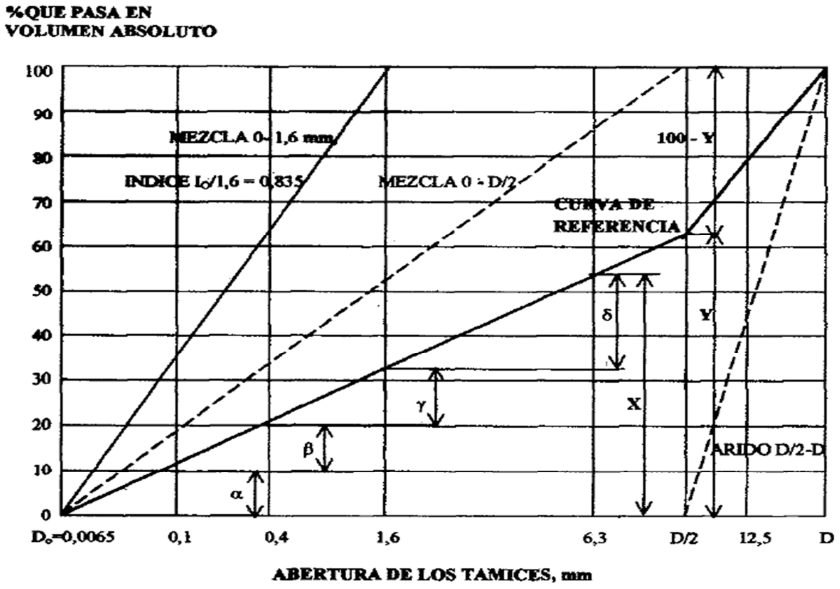


Figura 2.6 Representación gráfica de la curva de Faury [7]

La *determinación de las proporciones* en que hay que mezclar a los diferentes tamaños de áridos para que la granulometría de la mezcla se ajuste a la de la curva de referencia puede realizarse mediante tanteos, que es un sistema básicamente gráfico, o por medio de los índices ponderales, más exacto que el anterior. Su explicación, que comporta cierto grado de detalle, puede encontrarse en muchos de libros de hormigón [7] [11]; siendo éste el último paso para encontrar la *dosificación* del hormigón.

2.3.2.2 Métodos de dosificación basados en la resistencia a compresión

2.3.2.1 Método De La Peña

Este método establecido por el ingeniero español Carlos De La Peña en 1955, fija la *resistencia media* del hormigón que se desea dosificar siendo muy válido para hormigones estructurales de edificios, pavimentos, canales, depósitos de agua, puentes, etc., y en los que las condiciones de ejecución puedan estimarse como buenas.

Conocida la resistencia media, se determina la *relación agua/cemento* a través de la siguiente expresión:

$$\frac{C}{A} = K \cdot f_{cm} + 0{,}5$$

donde C/A es la relación agua/cemento del hormigón a fabricar, K es un valor en función del cemento empleado y del tipo de árido utilizado y f_{cm} es la resistencia media que depende de la resistencia característica f_{ck} y de las condiciones de ejecución en la obra.

Posteriormente, según la consistencia del hormigón que se dosifica y el tamaño máximo del árido del mismo, se determina la *cantidad de agua* necesaria por metro cúbico de hormigón a través de tablas.

La *consistencia* dependerá de la forma de puesta en obra del hormigón así como del molde y densidad de armaduras de las piezas. Por otro lado, el *tamaño máximo del árido* será el de la abertura del tamiz más pequeño de la serie empleada que retenga menos del 25% de la fracción más gruesa del árido.

Una vez conocida la relación cemento/agua, en peso, y el volumen de agua en litros por metro cúbico de hormigón, se multiplican estos dos valores para obtener el *peso de cemento*, en kilogramos, para dicho volumen.

Por último, se debe *determinar la composición granulométrica* del árido total. En este caso, a través de un gráfico en el que se debe establecer el porcentaje de arena, referido al volumen real del total del árido (abscisas), en función del módulo granulométrico de la arena (ordenadas) y del tamaño máximo del árido.

Cuando se trata de dos áridos (una arena y una grava), el porcentaje de arena con referencia al volumen real de todo el árido se determina en el gráfico entrando con el módulo granulométrico de la arena en ordenadas y viendo el punto en que la horizontal corta a la curva correspondiente al tamaño máximo del árido, en cuya vertical se tiene el porcentaje de arena en volumen, que restado a cien da el porcentaje de árido grueso.

Si por el contrario, existen más de dos áridos, se empieza por considerar como 'arena' al más fino de todos ellos y como 'gravas' a todos los demás. Seguidamente, y valiéndose del gráfico citado, se calcula el porcentaje de 'arena' con cada una de las 'gravas' tomadas una a una. A partir de los porcentajes de arena que resultan al considerar mezclas binarias con cada una de las gravas determinaremos la proporción en que deben ser mezclados los distintos áridos.

Es importante comentar que los valores hallados en el gráfico corresponden a un hormigón armado de consistencia adecuada para consolidar por picado con barra y en el que se han empleado áridos naturales de forma redondeada. Para hormigones con otras características es preciso aplicar, después de haber calculado el tanto por ciento de la mezcla de todos los áridos, las correcciones que De La Peña indica para distintos casos.

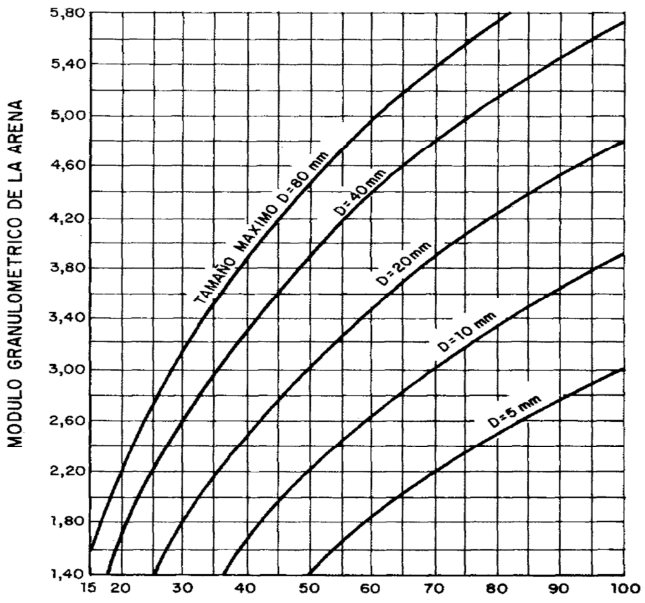


Figura 2.7 Representación gráfica del método de De La Peña [7]

Las *proporciones de la mezcla* se determinan teniendo en cuenta que para la obtención de 1 m^3 de hormigón se necesitan 1.025 litros de componentes sueltos debido a que la masa fresca experimenta una reducción de volumen estimada en un 2,5% debido a diversos factores de ejecución como a la evaporación de agua y a su absorción por el árido. También es debido a la retracción de la pasta de cemento. La ecuación resultante se define por:

$$A + \frac{C}{P_1} + \frac{G_1}{P_2} + \frac{G_2}{P_3} = 1025$$

donde G_1 y G_2 son las cantidades de arena y grava necesarias; P_1, P_2 y P_3 los pesos específicos de cemento, arena y grava respectivamente y A el volumen de agua.

2.3.2.2 Método A.C.I. para hormigones convencionales

El American Concrete Institute [12] es, sin lugar a dudas, uno de los métodos de dosificación más utilizados en todo el mundo, siendo adecuado para cualquier obra realizada con hormigón. Se caracteriza por fijar la *relación agua/cemento* según predominen las razones de durabilidad o de resistencia.

A través de la condición de *resistencia a compresión*, se indica la relación agua/cemento que debe emplearse, en tablas, para conseguir las distintas resistencias en función de si se incorpora aire, o no, al hormigón deseado. Los valores de estas resistencias estimados, son para un contenido de aire no mayor que el utilizado en las tablas lo que permite obtener la cantidad de agua, de manera que, para una relación agua/cemento constante, la resistencia del hormigón se reduce cuando el contenido de aire aumenta

La *cantidad de agua* a utilizar en el hormigón será función de la consistencia que deba tener el mismo, del tamaño máximo de árido elegido, de su forma y de su granulometría, y por la cantidad de aire incorporado y siendo independiente de la cantidad de cemento empleada.

El *tamaño máximo del árido* debe ser el mayor posible por razones de economía de cemento y de agua; sin embargo, éste no debe ser mayor que un quinto de la dimensión menor de la pieza a hormigonar ni mayor de tres cuartos de la separación mínima entre armaduras, ni de un tercio del espesor en el caso de una losa. Estas limitaciones pueden ser modificadas si por falta de trabajabilidad o de consolidación adecuada pueden aparecer coqueras o huecos.

Para determinar la *consistencia*, se debe escoger el asentamiento más reducido posible compatible con la colocación adecuada del hormigón en obra. Los valores que se recomiendan de asentamiento en el cono de Abrams, en función de los distintos tipos de construcción, se desprenden de tablas.

Conocida la relación agua/cemento y la cantidad de agua, se establece la *cantidad de cemento* que se ha de utilizar en la mezcla por metro cúbico de hormigón.

A partir de este punto, se determinan las *cantidades de árido grueso y de árido fino* que intervienen en la mezcla. El método A.C.I. no hace uso de curvas de referencia para este fin. En lo que respecta al árido grueso, es interesante que se utilice en la mayor cantidad posible, compatible con la docilidad, a fin de conseguir la máxima resistencia, la mínima cantidad de agua de amasado y la menor retracción.

Esta cantidad se determina mediante ensayos de laboratorio, sin embargo, si no se dispone de tales datos, puede obtenerse una indicación aceptable con la ayuda de tablas; éstas proporcionan el volumen de árido grueso por unidad de volumen de hormigón en función del diámetro máximo del árido, de la docilidad y del módulo de finura de la arena. El peso de grava por metro cúbico de hormigón se calcula multiplicando el valor obtenido por mil y por la densidad de conjunto de la grava (en kg/dm^3).

El contenido de árido fino puede obtenerse por el método de los volúmenes absolutos o por el de los pesos. En el primero, el volumen de arena se halla restando a 1.025 el volumen de árido grueso, cemento, agua y aire. En el segundo, el peso del árido fino se determina como la diferencia entre el peso del hormigón fresco y la suma de los pesos de los otros componentes.

Este sistema se basa en que, por experiencia, se conoce el peso del metro cúbico de hormigón fresco, aunque si esto no fuese así, pueden emplearse valores dados en tablas.

2.4 HORMIGÓN RECICLADO

2.4.1 Generalidades

En general, se denomina hormigón reciclado al material derivado de un proceso de fabricación de la mezcla de diversos componentes que incluye, a diferencia del hormigón convencional, árido reciclado procedente del machaqueo de residuos de construcciones y de demoliciones (RCD).

Por otro lado, se entiende como árido reciclado al resultante del procesamiento de materiales inorgánicos utilizados previamente como materiales de construcción [13] [14]. Este material, se obtiene por tanto, a partir de los materiales generados como residuo durante los procesos de construcción y/o de demolición. Este hecho hace que su composición sea heterogénea por lo que el material que se obtenga no podrá considerarse uniforme siendo su composición notablemente diferente en cada caso.

Se pueden distinguir a groso modo los siguientes tipos de árido reciclado según la naturaleza de los residuos de origen:

1. "Árido reciclado procedente del hormigón": Alcanzado a través de procesos de machaqueo, criba y procesado de residuos derivados del hormigón con clinker Portland y áridos naturales en plantas de reciclaje [7]. Este árido, al provenir del hormigón, cuya composición es heterogénea (cemento, agua, áridos, aditivos y adiciones), no se puede considerar como material uniforme. Su composición puede ser considerablemente diferente en función de diversos factores, entre ellos, la proporción de mortero adherido presente en el residuo.

2. "Árido reciclado cerámico": Se considera como árido reciclado cerámico a aquel que contiene al menos un 65% en peso de ladrillo y/o ladrillo silico-calcáreo, mezclados o no con hormigón. En España, generalmente, son derivados de residuos de procesos de producción industrial en el sector cerámico [15].

3. "Árido reciclado mixto": Es el producto generado fruto de mezclas de residuos de diversa naturaleza como: restos de hormigón, ladrillos, azulejos, cerámica, vidrio, yeso, materiales bituminosos… En la normativa holandesa se define como un árido reciclado que debe contener un porcentaje de hormigón superior al 50% con una densidad seca superior a 2100 kg/m^3 y no más del 50% de materiales pétreos reciclados de diferente naturaleza que el hormigón, incluyendo el material cerámico, con una densidad seca superior a 1600 kg/m^3 [13].

Tal y como se ha dicho, los áridos reciclados son el resultado de la gestión y tratamiento de los residuos de construcción y/o demolición. En el primer caso, al generarse una cantidad más reducida de residuos hace que sea común trasladarlos a plantas de reciclaje fijas. Su funcionamiento es similar al de cualquier planta de tratamiento de áridos convencionales e incorporan mecanismos de separación de impurezas y otros contaminantes.

Por otro lado, las operaciones de demolición producen un gran número de residuos. Esto aumenta los costes de transporte por lo que, a veces, se montan plantas móviles de tratamiento a pie de obra. Las tareas de demolición se han de plantear de forma que permitan la reutilización del máximo volumen de componentes y materiales. Con el fin de que no se produzca una contaminación excesiva del hormigón con otros materiales, el proceso de demolición se debe de realizar de una forma selectiva. Estos trabajos previos, pese a encarecer el trabajo de demolición con respecto al sistema tradicional, pueden compensarse con la reducción de tasas de vertido y transporte.

2.4.2 Propiedades de los áridos reciclados

2.4.2.1 Mortero Adherido

Sin duda, una de las principales diferencias entre un árido reciclado y un árido convencional reside en la cantidad de mortero adherido que incluye el primero. El contenido de mortero en el árido reciclado dependerá en gran medida de la relación a/c del hormigón de origen.

Ciertos estudios demuestran un menor contenido adherido con relaciones elevadas a/c por efecto de la pérdida de mortero durante el proceso de criba y machaqueo debido a su matriz más débil [(16)]. La cantidad de mortero hace que, dichos áridos, presenten propiedades distintas a los naturales afectando negativamente al módulo de elasticidad del hormigón, a su retracción, fluencia y durabilidad [(17)] como consecuencia de la menor densidad y mayor absorción que presentan estos áridos con respecto a los de origen natural. Por lo tanto, esto condicionará el comportamiento del hormigón que se fabrique con ellos.

Es importante destacar que, a pesar de su gran importancia, actualmente, no existe un procedimiento normalizado [(18)] para evaluar la cantidad de mortero adherido al árido reciclado. Esto es muy negativo ya que provoca grandes variaciones en los resultados obtenidos al estar muy condicionados al procedimiento de ensayo. Algunos métodos, tratan de evaluarlo mediante la fabricación de hormigones reciclados con cemento coloreado. De esta manera, una vez cortadas las probetas en rebanadas y pulidas sus caras, se procede a estudiar la superficie mediante el uso de un planímetro que mide la superficie de mortero adherido que se distingue gracias a la coloración dada al cemento [(19)]. Esto permite estimar el volumen contenido del mismo. Otras metodologías, en cambio, tratan de eliminar el mortero contenido en la superficie del árido original [(20)]. De esta forma, mediante el uso una báscula, se pretende establecer el porcentaje en peso de mortero que contiene el árido a través de sucesivos pesajes antes y después de su eliminación.

2.4.2.2 Granulometría

La distribución granulométrica de los áridos es uno de los parámetros más importantes empleados en la dosificación del hormigón (gran parte de los métodos de dosificación presentan especificaciones sobre las granulometrías óptimas que deben tener los áridos), puesto que constituye su esqueleto y tiene una gran influencia sobre sus características finales.

Propiedades como la trabajabilidad, el grado de compactación, la resistencia, la porosidad, la permeabilidad y la durabilidad [21] se ven comprometidas por variaciones de la curva granulométrica.

La granulometría del árido reciclado depende fundamentalmente del proceso de criba y machaqueo que se haya empleado en su sistema de producción. Los áridos reciclados presentan formas angulosas debido a ello y un aspecto rugoso como consecuencia del mortero que poseen adherido. El porcentaje de árido grueso obtenido suele variar alrededor del 70-90% del árido total producido [22], dependiendo de la composición del hormigón original y del tamaño máximo del árido.

Por lo general, esta fracción gruesa se ajusta a los requerimientos que exigen las normativas vigentes que establecen los husos granulométricos de referencia. Según la EHE-08 [23], se prescribe el empleo de la UNE EN 933-2:96 que determina como serie básica de tamices la formada por los siguientes: 0,063-0,125-0,250-0,500-1-2-4-8-16-31,5-63-125 mm. Para el árido grueso, además se incluyen los tamices 10-20-40 mm contemplados en la serie complementaria R 20.

Como consecuencia de la disgregación que sufre el árido grueso reciclado durante su transporte y almacenamiento, una vez cribado se siguen obteniendo porcentajes muy reducidos de arena debido a su mayor friabilidad [24]. Dichos valores oscilan entre el 0,5% y el 2% [25]. Esta fracción se caracteriza por presentar un elevado contenido de mortero que influye negativamente en las propiedades del hormigón. El porcentaje de desclasificados (partículas inferiores a 4 mm) en áridos reciclados establecido por la EHE-08 tiene como límite el 10% debiendo ser el contenido de partículas que pasan por el tamiz de 4 mm no superior al 5%.

Por otra parte, fruto del desprendimiento de pequeñas partículas de mortero durante el proceso de manipulación del árido grueso reciclado, se genera un pequeño porcentaje de finos que varía entre el 0,27% y el 1,14% según estudios realizados en España [25]. La EHE-08, establece un límite en relación a la cantidad de finos admisible del 1% del árido reciclado grueso observándose que dichos valores quedan por debajo del mismo en la mayoría de los casos. Una presencia en exceso de finos genera problemas de adherencia entre el árido y la pasta de cemento. Por otra parte provoca un aumento del uso de la cantidad de agua durante el proceso de amasado.

2.4.2.3 Forma y textura

Los métodos de determinación de la forma de los áridos reciclados van desde el uso de técnicas de microscopía óptica y electrónica hasta la evaluación a través del índice de angulosidad, pasando por la estimación del coeficiente de forma o del índice de lajas.

Cuando el estudio se determina mediante el coeficiente de forma, el árido reciclado presenta valores similares al del árido natural [25], con un rango de valores del 0,17 al 0,35 que puede verse afectado por el sistema de trituración empleado en la obtención del árido reciclado.

La Instrucción española EHE-08 indica que el coeficiente de forma del árido grueso debe ser superior a 0,20, por lo que árido cumplirá, en general, esta especificación.

En cambio, si para determinar la forma se utiliza el método del índice de lajas, el árido reciclado presenta valores inferiores al árido natural [26] [27]. Esto se debe, probablemente, al mortero que queda adherido en las caras planas de las partículas con forma de laja, aumentando su espesor. Los valores medios que presentan los áridos reciclados procedentes de hormigón oscilan entre el 5% y el 9%, cumpliendo con el límite que establece la EHE-08 de 35%.

Algunos estudios han valorado la forma del árido a través de su angulosidad, concluyendo que las partículas de áridos reciclados son más angulosas [27].

Por otro lado, las fracciones de menor tamaño del árido grueso son las que presentan una forma más desfavorable, utilizando como referencia tanto el coeficiente de forma como el índice de lajas [25].

En cuanto a la textura, las partículas de árido reciclado suelen presentar una textura más rugosa y porosa que la de los áridos naturales. Esto se debe a la presencia de mortero adherido a la superficie del árido origen natural. Esta circunstancia hace que los hormigones que se fabriquen con ellos presenten problemas de trabajabilidad al provocar una mayor absorción de agua durante el proceso de amasado [28].

2.4.2.4 Densidad

Debido a la presencia de pasta de mortero adherida, cuya densidad es inferior a la del propio árido, la densidad de los áridos reciclados es inferior a la de los áridos convencionales [29]. No obstante, este valor de densidad puede verse condicionado en función de diversos factores tales como el proceso de producción del árido reciclado, el tamaño de las fracciones que se obtienen o el grado de contaminación del material de procedencia.

La densidad del árido reciclado suele oscilar entre 2100 y 2400 kg/m3 [30], mientras que la densidad saturada con superficie seca varía entre 2.300 y 2.500 kg/m3, de manera que en todos los casos se pueden considerar estos áridos de densidad normal (no ligeros). La evaluación de dicha densidad se realiza utilizando la norma UNE-EN 1097-6 [31].

Estudios realizados [30] ponen de manifiesto la relación existente entre la densidad y el agua de absorción de los áridos reciclados y la resistencia mecánica a compresión, pudiendo anticipar el comportamiento del hormigón con áridos reciclados con un conocimiento previo de dichas propiedades.

El uso de la densidad como parámetro para determinar la calidad de los áridos reciclados es presentado por algunos autores [28] como la propiedad más objetiva y físicamente más apropiada para su caracterización.

2.4.2.5 Absorción

La absorción en los áridos reciclados alcanza valores muy superiores a los obtenidos en los áridos naturales por la cantidad de mortero adherido que presentan dichos áridos. En áridos naturales, los valores de la absorción oscilan entre un 0-4% mientras que, en los diferentes estudios consultados, los valores obtenidos en áridos reciclados van desde un 3,3% hasta un 13% [32] aunque, por lo general, la mayoría sobrepasa el valor límite de un 5% establecido por la EHE-08.

El tamaño del árido reciclado influye de manera decisiva sobre la absorción. En las fracciones más finas, la absorción es mayor puesto que la cantidad de mortero adherido es superior al de las fracciones más gruesas [33]. Esto se acusa cuanto menor sea la densidad del árido reciclado. Por otro lado, estudios realizados [34] demuestran que la absorción del árido reciclado tiene una relación directa con la relación a/c del hormigón del origen. Además, cuando los áridos reciclados proceden de hormigones que presentan resistencias elevadas la absorción es menor que en los de resistencias más bajas.

Otros estudios [35] demuestran que la mayor parte de la absorción se produce durante los primeros 10 minutos, disminuyendo lentamente con el paso del tiempo y tendiendo a la saturación. La absorción específica y la velocidad de absorción en los áridos reciclados son mayores que en los naturales.

2.4.2.6 Contaminantes e impurezas

Uno de los mayores problemas que plantean los áridos reciclados es que a menudo pueden incorporar impurezas y contaminantes que influyen negativamente en las propiedades del hormigón. Estos contaminantes pueden ser muy variados, como plástico, madera, yeso, ladrillo, vidrio, materia orgánica, aluminio, asfalto, etc.

Estas impurezas producen en todos los casos un descenso de la resistencia del hormigón, más acentuado si se trata de cal o arcilla, y en menor medida cuando se trata de asfalto o pinturas. Además, dependiendo del tipo de impureza, se pueden presentar otros problemas como reacciones álcali-árido (vidrio), ataque por sulfatos (yeso), desconchados superficiales (madera o papel), elevada retracción (tierras arcillosas) o mal comportamiento hielo-deshielo (algunos cerámicos).

La presencia de impurezas depende en gran medida del tipo de árido reciclado. El árido procedente de escombros de hormigón presenta generalmente un reducido contenido de impurezas, mientras que la incorporación de escombros cerámicos, a pesar de ser en pequeños porcentajes, aumenta generalmente la presencia de diferentes materiales como madera, yeso o vidrio. Hay que añadir que las fracciones más finas suelen incorporar un mayor contenido de impurezas.

En los ensayos realizados en estudios españoles [25], el contenido oscila entre 4-12% en áridos procedentes de escombros de hormigón con cerámicos y entre 0,4-2,4% en áridos procedentes de escombros de hormigón.

La separación de contaminantes e impurezas se realiza manualmente por identificación visual de los mismos.

2.4.3 Propiedades del hormigón reciclado fresco

Se denomina hormigón fresco al que, por poseer plasticidad, tiene la facultad de poder moldearse. El hormigón fresco posee una vida que está comprendida entre el momento en que abandona la amasadora u hormigonera y el momento en que se inicia el fraguado del cemento; esta vida es variable, ya que depende de muchos factores como el tipo de cemento, la relación agua/cemento, la temperatura, uso de aditivos, etc.

2.4.3.1 Consistencia

Se define como consistencia a la mayor o menor facilidad que tiene el hormigón fresco para deformarse y por consiguiente ocupar todos los huecos del molde o encofrado [7]. Influyen en ella distintos factores, especialmente la cantidad de agua de amasado, pero también la procedencia del árido, su tamaño máximo y su granulometría.

En el caso del hormigón reciclado, su proceso de fabricación respecto al del hormigón convencional, conlleva a un aumento de la consistencia para una misma relación a/c [36]. Esto se debe a la mayor capacidad de absorción de los áridos reciclados que provoca una reducción de la relación a/c efectiva durante el proceso de amasado. Como consecuencia la consistencia del hormigón fresco aumenta.

Aunque el factor fundamental que provoca un aumento en la demanda de agua en estos hormigones es la elevada absorción del árido reciclado, otros factores como su textura rugosa o el cambio de la granulometría del árido reciclado durante el proceso de amasado pueden contribuir a dicho incremento.

Es importante destacar que existen técnicas que se aplican con total normalidad para obtener una determinada consistencia. Estas pueden resumirse en:

1. Estimar la cantidad de agua adicional que se debe añadir mediante ensayos previos.
2. Saturar el árido reciclado antes de proceder al amasado.
3. Utilizar superplastificante como aditivo.

Respecto a la primera opción cabe indicar que, al presentar bastante heterogeneidad el árido reciclado, será difícil establecer un valor único para la absorción y para la cantidad de agua que necesitará añadirse.

Por otro lado, la saturación del árido reciclado, para la producción de hormigón a escala industrial, presenta problemas logísticos ya que en la planta de fabricación habría que disponer de las instalaciones adecuadas que permitieran sumergir los áridos que se encuentran en el acopio hasta lograr su saturación.

La adición de un aditivo superplastificante en un momento dado permite corregir la consistencia del hormigón sin alterar las propiedades mecánicas del hormigón resultante. No obstante, el uso de dicho agregado puede ver encarecido el coste de producción del hormigón.

2.4.3.2 Trabajabilidad

La trabajabilidad del hormigón fresco determina la facilidad con la cual una mezcla de hormigón puede ser manejada sin que se produzca segregación y exudación [7].

En el caso de hormigones reciclados, determinados estudios [37] concluyen que la trabajabilidad decrece en paralelo con el aumento de la proporción de árido reciclado en la mezcla, alcanzando valores de disminución del 15-20% para sustituciones del 100%.

No obstante, hormigones elaborados con árido reciclado pueden llegar a obtener trabajabilidades similares a los hormigones convencionales cuando los áridos que se utilizan están en condiciones saturadas con superficie seca o cuando en su diseño se incluyen superplastificantes.

2.4.4 Propiedades del hormigón reciclado endurecido

Se define como hormigón endurecido al que no cumple con la definición de hormigón fresco, es decir, al que se caracteriza por su dureza y rigidez que se produce cuando ha terminado el proceso de fraguado.

2.4.4.1 Densidad seca

Debido a la presencia de pasta de mortero adherida la densidad de los áridos reciclados es inferior a la de los áridos convencionales [29], esto hace que la densidad del hormigón reciclado endurecido sea inferior a la del hormigón convencional.

Existen estudios realizados [38] en los que se corrobora que este descenso es prácticamente inapreciable cuando la sustitución del árido grueso es del 20%. Cuando la sustitución es del 50% la densidad experimenta una reducción media del 2%. Dicha reducción llega a un valor medio del 3,5% cuando el porcentaje sustituido de árido grueso es del 100%.

2.4.4.2 Resistencia a compresión

Se define resistencia a compresión como el esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga axial de aplastamiento [39].

Generalmente, bajo la misma relación agua/cemento, los hormigones reciclados son de menor resistencia respecto a los hormigones convencionales. Dicha disminución se hace más significativa cuanto mayor sea el porcentaje de árido grueso sustituido. Básicamente, esto se debe a:

1. El mortero adherido contenido en la matriz rocosa hace que el árido reciclado tenga una menor resistencia mecánica que el árido natural [40].

2. La débil unión existente entre los áridos reciclados (que contienen un cierto porcentaje de mortero adherido del hormigón de procedencia) y el nuevo mortero hace que se formen en las superficies de contacto zonas débiles en la masa de hormigón endurecido [18].

Ciertos estudios [41] [42] sugieren que con dosificaciones de árido reciclado hasta un 20-30% de la sustitución de la fracción gruesa, apenas se producen diferencias resistentes con los hormigones de control por lo que los hace adecuados para uso como hormigón estructural.

Para ratios de sustitución del 100% se produce una caída en la resistencia en torno al 20-30% [43]. Paradójicamente, con hormigones de origen de elevada calidad, con relación de agua/cemento 0,4-0,5 y de muy elevada resistencia, se han conseguido hormigones de mayor resistencia (5-20%) con una disminución de la fluidez en el hormigón fresco. Esto se debe a que la elevada absorción del árido reciclado provoca que la relación agua/cemento efectiva sea menor.

De esto se desprende otro de los aspectos que influyen directamente en la resistencia a compresión del hormigón reciclado: la calidad del hormigón de origen. Con un árido reciclado de baja calidad, procedente de un hormigón de baja resistencia o en mal estado, el hormigón reciclado fabricado no superará en resistencia a compresión al del hormigón original ni reduciendo la relación agua/cemento. Por el contrario, si los áridos reciclados proceden de hormigones con una elevada calidad (hormigón de origen con resistencia elevada y en buen estado) el hormigón reciclado obtenido sustituyendo el árido grueso a partir de ellos podrá presentar resistencias incluso superiores a las del hormigón de control.

Así se puede observar en el figura 2.9 cómo, a partir de áridos procedentes de hormigones cuya resistencia era de 30 MPa, pueden fabricarse hormigones reciclados, sustituyendo el árido grueso, con resistencias por encima de los 35 MPa reduciendo adecuadamente la relación agua-cemento.

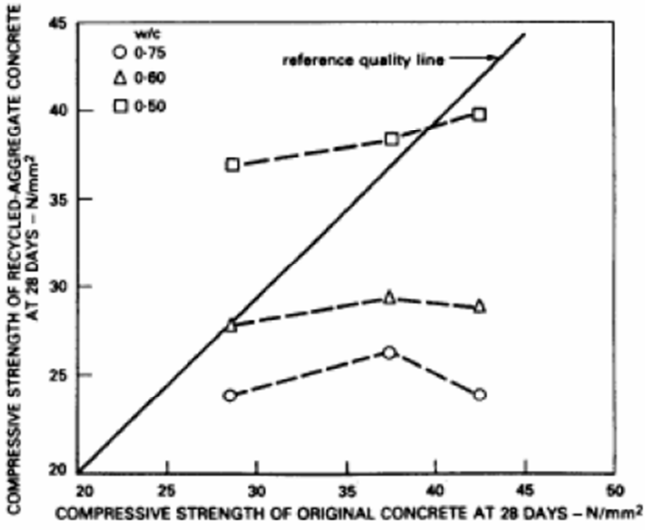


Figura 2.8 Relación entre la resistencia a compresión del hormigón original y el reciclado [44]

Por otro lado, el modo de rotura en los ensayos de resistencia a compresión se produce principalmente de forma intragranular debido a la cantidad de mortero adherido que lleva consigo el árido reciclado. En cualquier caso será función de la naturaleza del árido natural y de la cantidad de mortero adherida al mismo [45].

Los resultados de ensayo pueden alcanzar coeficientes de variación de hasta el 25% [46] cuando el hormigón de origen no presenta una uniformidad elevada por proceder de distintas partidas. En estas ocasiones la dosificación del hormigón debe proporcionar resistencias a compresión altas para lograr obtener la resistencia característica requerida. El coeficiente de variación adoptará valores bajos si el árido reciclado es homogéneo y es contrastada su calidad.

Asimismo, la calidad del árido reciclado influye directamente sobre la resistencia a compresión del hormigón reciclado. Si la proporción total de agua/cemento se mantiene constante y la pérdida de trabajabilidad, debido al efecto de los áridos reciclados, se ve compensada por el uso de aditivos, un aumento en la sustitución del porcentaje de áridos reciclados utilizados no modifica los valores de resistencia mecánica [47]. El porcentaje de pérdida de resistencia debido al uso de áridos reciclados es más significativo en un hormigón de origen de baja resistencia que en uno de alta resistencia.

2.4.4.3 Módulo de elasticidad

Se define como módulo de elasticidad a la propiedad general de los cuerpos sólidos, en virtud de la cual recobran más o menos completamente su extensión y forma, tan pronto como cesa la acción de la fuerza que los deforman [48]. Él módulo de elasticidad del hormigón representa la rigidez de este material ante una carga impuesta sobre el mismo

Generalmente, cuanto mayor sea el módulo de elasticidad del árido total y mayor sea la proporción en la que se mezclen con los demás componentes más alto será el valor del módulo de elasticidad del hormigón fabricado con ellos.

Los áridos reciclados están formados por una matriz rocosa y por la cantidad de mortero que los envuelve. El módulo de elasticidad de la pasta que se forma es inferior al del árido y al del hormigón resultante [49]. Debido a esta circunstancia, los áridos reciclados presentarán un módulo de elasticidad inferior al de los áridos naturales y el módulo de elasticidad del hormigón reciclado será inferior al del hormigón convencional.

Además, la textura superficial más rugosa de los áridos reciclados y las pequeñas microfisuras que puede presentar el mortero adherido hacen que el módulo de elasticidad se reduzca [50].

Algunos estudios [38] [41] indican que en hormigones con sustitución del árido grueso en un porcentaje que no sobrepase el 30% la caída del valor del módulo se sitúa en torno del 4% al 10%. Cuando la sustitución llega hasta el 50% del árido grueso la reducción que experimenta el módulo de elasticidad puede llegar al 20%. Si el árido grueso sustituido es del 100% la reducción del módulo aumenta llegando a alcanzar valores del 50%.

En la figura 2.10 puede observarse como el módulo de elasticidad de los hormigones reciclados disminuye a medida que aumenta el porcentaje de sustitución del árido grueso [51]. Puede observarse que cuando la sustitución del árido grueso alcanza el 100% la reducción del módulo de elasticidad se aproxima al 45%.

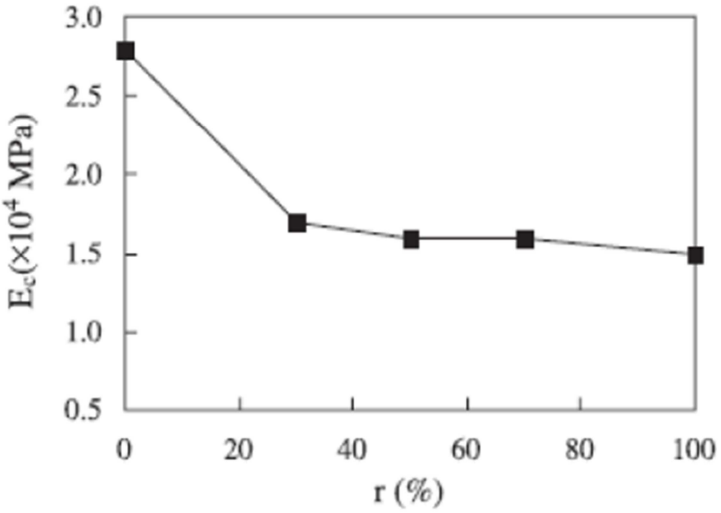


Figura 2.9 Reducción del módulo de elasticidad en hormigones reciclados [51]

2.4.5 Métodos de dosificación para hormigones reciclados

Los métodos de dosificación habituales para los hormigones convencionales son válidos para los hormigones reciclados con un porcentaje de árido reciclado no superior al 20% [23]. En cualquier caso, se recomienda realizar ensayos previos para ajustar la dosificación.

En hormigones reciclados con sustituciones superiores al 20%, y debido a la menor calidad de los áridos reciclados, para mantener la misma resistencia y durabilidad que un hormigón convencional, se recomienda en la bibliografía que, el hormigón fabricado con áridos reciclados, necesitará un contenido mayor de cemento o una menor relación agua/cemento en su dosificación.

Igualmente, para conseguir la consistencia deseada, suele ser necesario añadir más agua a la dosificación para compensar la mayor absorción del árido reciclado. Otras posibilidades pueden ser utilizar aditivos plastificantes o superplastificantes en la dosificación o presaturar el árido reciclado.

2.4.5.1 Método del volumen de mortero equivalente E.M.V.

Este método, desarrollado recientemente por una serie de ingenieros en Canadá [4] y fundamentado en base al americano A.C.I. [6], busca confeccionar hormigones con áridos reciclados con características similares a las de los hormigones convencionales.

La característica más destacada de este método, reside en el tratamiento del mortero residual contenido en los áridos reciclados como parte del contenido total de mortero en los hormigones reciclados a fabricar.

Conociendo previamente la cantidad de mortero adherido al árido natural en los áridos reciclados (se realizan ensayos previos para determinarlo), el método trata de igualar el volumen contenido de mortero y árido grueso en la mezcla respecto al volumen que contendría un hormigón convencional. Dicho contenido de mortero será el resultante de considerar el volumen residual adherido al propio árido reciclado y el volumen fresco generado en el nuevo hormigón confeccionado.

Para igualar estos volúmenes, el método fundamentalmente provoca un descenso en el uso de cemento, arena y de agua en la mezcla (al considerar que parte de éste ya está presente en el mortero residual contenido en el árido reciclado), para substituirlo e igualar los volúmenes por árido grueso (considerando un árido reciclado de geometría similar a la del convencional). En la figura 2.10, se muestra un esquema de lo comentado anteriormente.

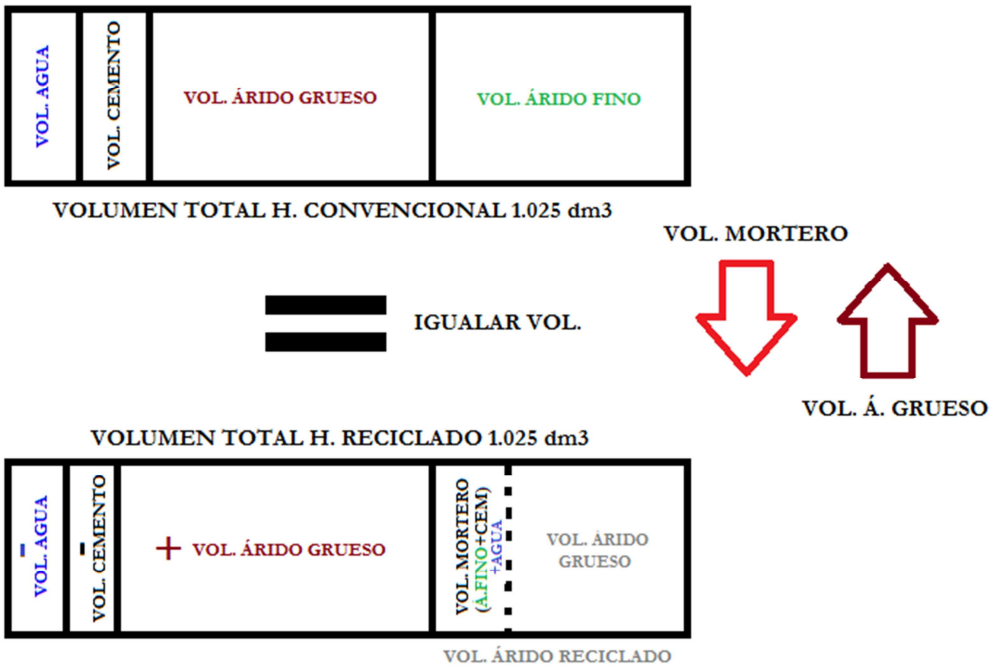


Figura 2.10 Esquema del principal fundamento del método del volumen de mortero equivalente (E.M.V.) (elaboración propia)

Para adaptar dicho método al de Bolomey, se parte del desarrollo de una dosificación convencional con éste último. Obtenidos los pesos de cada componente del hormigón, se aplica la metodología basada en el A.C.I. teniendo en cuenta que se deberá:

1. Obtener la cantidad de mortero adherido al árido natural en el árido reciclado. Con esto se puede realizar un reemplazo de los materiales componentes del mortero. La idea es tomar en cuenta el mortero que ya posee el árido reciclado y restarlo de la mezcla que se ha calculado, intentando lograr con esto una cantidad de mortero y árido natural igual a las del hormigón convencional.

2. Obtener el volumen aparente compactado del árido grueso. Esto se logra con los datos del peso del árido grueso y la densidad aparente compactada del mismo, con la finalidad de obtener luego los volúmenes del resto de componentes a agregar. Este paso es necesario para obtener los parámetros usados por la metodología A.C.I..

Hechos los reemplazos comentados anteriormente, se obtienen finalmente los pesos y volúmenes de los componentes finales para el hormigón a fabricar.

2.5 NORMATIVA ACTUAL SOBRE ÁRIDOS RECICLADOS

2.5.1 Generalidades

La necesidad de la utilización de áridos reciclados en la construcción está fundamentada por motivos de índole medioambiental, debido a la generación de grandes volúmenes de residuos de difícil gestión. Para fomentar el reciclaje en los países es necesario el apoyo de normativas que garanticen una utilización adecuada del material para las distintas aplicaciones.

No obstante, existen pocos estados que dispongan de normativas o recomendaciones para el empleo de este tipo de áridos en hormigón estructural, encontrándose distintas tendencias en cuanto a la calidad exigida al árido reciclado, al contenido máximo permitido en el hormigón o a la limitación en las aplicaciones de éste.

Por suerte, cada vez son más los países que desarrollan su propio marco normado para fomentar dicho uso. Este es el caso de España que, hace relativamente poco tiempo (Julio 2008), ha incorporado en la nueva EHE-08 aspectos fundamentales en la contribución a la sostenibilidad y la incorporación de nuevos hormigones como los reciclados.

A continuación se hace un resumen de la situación actual en España y por extensión en la Comunidad Europea.

2.5.1.1 Estado actual en España

En el anejo 15 "Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados" de la EHE-08 quedan detalladas las recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados. Entre ellas se destacan aquellas que inciden en las características del árido reciclado:

1. Excluye los áridos finos reciclados para la fabricación de hormigón.

2. No permite la fabricación de hormigón con áridos reciclados de distinta naturaleza al hormigón así como con aquellos que, aunque procedan de residuos de hormigón, puedan estar afectados por patologías que afecten a su calidad tales como ataque por sulfatos, fuego, reactividad álcali-árido, etc o provengan de hormigones especiales como el aluminoso, con fibras, polímeros, etc.

3. El tamaño del árido permitido es de 4 mm presentando como máximo un 5% en peso de partículas que pasen por dicho tamiz así como un 10% de desclasificados.

4. Cuando la sustitución de árido grueso por árido reciclado no supere el 20% el contenido de terrones de arcilla en dicho árido no será superior al 0,6%. En el árido natural no excederá del 0,15%.

5. El contenido de material cerámico no deberá exceder del 5% en peso del total de la muestra, las partículas ligeras en el 1%, el asfalto en el 1% y otros materiales como vidrio, plásticos, metales, en el 1%.

6. La absorción en el árido reciclado no será superior al 7% cuando el porcentaje de sustitución del árido grueso no supere el 20%. En este caso el árido grueso natural no presentará una absorción superior al 4,5%. Si se supera el 20% de sustitución la mezcla de árido reciclado y árido natural no debe presentar un valor de la absorción superior al 5%.

7. El contenido de cloruros, de sulfatos, de partículas blandas y de las que tienen bajo peso específico serán los mismos que los prescritos en la Instrucción para áridos naturales.

8. La resistencia al desgaste será la misma que en los áridos naturales con un coeficiente de Los Ángeles máximo del 40%.

9. La granulometría, el coeficiente de forma y el índice de lajas del árido reciclado serán los adecuados para su empleo en hormigón estructural.

10. En el anejo 18 de la EHE-08 "Hormigones de uso no estructural", se establece que se podrá utilizar hasta un 100% de árido grueso reciclado procedente de la trituración de residuos de hormigón, siempre que cumplan las especificaciones definidas en el anejo 15.

2.5.1.2 Estado actual en la Comunidad Europea

Son muchas las distintas normas nacionales que coexisten en la Comunidad Europea con las que provienen del Comité Europeo de Normalización (CEN). Esto hace que uno se pueda encontrar con una cierta variedad en cuanto a la clasificación de los áridos reciclados.

En Reino Unido la norma BS-EN 206-1 [52] clasifica el árido reciclado en dos tipos diferentes:

1. RCA: Árido reciclado procedente de residuos de hormigón con un contenido máximo de impurezas como material cerámico, partículas ligeras, asfalto, vidrio, plástico, etc del 17%. La resistencia máxima recomendable del hormigón fabricado con este tipo de árido no superará los 40 MPa.

2. RA: Árido reciclado procedente de materiales cerámicos o mezclado con hormigón. El contenido de materiales cerámicos puede ser del 100%. Se utiliza en hormigones pobres con resistencias a compresión que no llegan a los 20 MPa.

En Alemania la norma DIN 4226-100 [53] clasifica los áridos reciclados en cuatro categorías diferentes:

1. TIPO 1: Son áridos que proceden mayoritariamente de residuos de hormigón o de áridos minerales. Presentan un contenido máximo de clinker, ladrillo y arenisca caliza del 10%.

2. TIPO 2: Son áridos que proceden mayoritariamente de residuos de hormigón o de áridos minerales en con un porcentaje mínimo del 70%. Presentan un contenido máximo de clinker, ladrillo y arenisca caliza del 30%.

3. TIPO 3: Son áridos que en su mayoría proceden de residuos cerámicos en una proporción mínima del 80%. Presentan un contenido máximo de materiales procedentes de hormigón o áridos minerales del 20%.

4. TIPO 4: Son áridos que en su mayoría proceden de una mezcla de RCDs con un contenido mínimo del 80% de material procedente de hormigón, áridos minerales o productos cerámicos.

La International Union of Testing and Research Laboratoires for Materials and Structures (RILEM) [54] distingue tres tipos de áridos reciclados:

1. TIPO I: Áridos procedentes mayoritariamente de fábrica de ladrillo.

2. TIPO II: Áridos procedentes mayoritariamente de residuos de hormigón con un contenido máximo de residuos cerámicos del 10%.

3. TIPO III: Áridos compuestos por una mezcla de áridos naturales mayor del 80%. El resto puede estar integrado por un 10% como máximo de áridos tipo I o hasta un 20% de áridos tipo II.

Las especificaciones belgas [55] para el uso del árido reciclado son muy similares a las recomendaciones de la RILEM, estableciendo una clasificación del árido reciclado en dos grupos:

1. El árido tipo GBSB-I correspondería al árido Tipo I de la RILEM, compuesto principalmente de escombros de fábrica de ladrillo

2. El árido GBSB-II correspondería al árido Tipo II de la RILEM, compuesto de árido procedente mayoritariamente de hormigón

En la siguiente tabla 2.1 se puede observar un resumen de las normativas comentadas. Cada una de estas normativas instituye un criterio de clasificación propio a partir del cual se establecen las restricciones a los resultados de los ensayos que se derivan de sus propiedades. Asimismo estas clasificaciones también son usadas en cada uno de los países donde son válidas para determinar los criterios de aplicación de estos áridos reciclados.

Tabla 2.1 Tabla resumen de las especificaciones comentadas para los diferentes áridos [23] [52] [53] [54] [55]

Características	RILEM			ALEMANIA				REINO UNIDO		BÉLGICA		ESPAÑA
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	RCA	RA	GBSB-I	GBSB-II	
Densidad seca (kg/m³)	≥ 1500	≥ 2000	≥ 2400	≥ 2000		≥ 1800	≥ 1500			≥ 1600	≥ 2100	
Absorción (%)	≤ 20	≤ 10	≤ 3	≤ 10	≤ 15	≤ 20				≤ 18	≤ 9	≤ 7
Material de densidad ≤ 2200 kg/m³ (%)		≤ 10	≤ 10								≤ 10	
Material de densidad ≤ 1800 kg/m³ (%)	≤ 10	≤ 1	≤ 1							≤ 10	≤ 1	
Material de densidad ≤ 1000 kg/m³ (%)	≤ 1	≤ 0,5	≤ 0,5					≤ 0,5	≤ 1	≤ 1	≤ 0,5	≤ 1
Contenido en metales, vidrios, materiales blandos, betún (%)	≤ 5	≤ 1	≤ 1					≤ 1	≤ 1	≤ 1		≤ 1
Contenido de materia orgánica (%)	≤ 1	≤ 0,5	≤ 0,5							≤ 0,5		
Contenido de material cerámico (%)	≤ 100				≤ 30	≤ 80		≤ 5	≤ 100	≤ 100		≤ 5
Contenido de asfalto (%)					≤ 1	≤ 1						≤ 1
Contenido de arena < 4 mm (%)	≤ 5	≤ 5	≤ 5									≤ 5
Contenido de finos < 0,063 mm (%)	≤ 3	≤ 2	≤ 2	≤ 4		≤ 4		≤ 5	≤ 3	≤ 5	≤ 3	
Contenido de sulfatos (%)	≤ 1	≤ 1	≤ 1					≤ 1	≤ 1	≤ 1		≤ 0,8
Contenido de cloruros (%)				≤0,04		≤ 0,15				≤ 0,06		≤ 0,05
Desclasificados inferiores (%)												≤ 10

Capítulo 3

Fase experimental

3.1 INTRODUCCIÓN

Como toda tesis científico-experimental, el apartado empírico juega un papel esencial en el desarrollo de la misma y es, en este capítulo, donde se detalla la metodología que se ha llevado a cabo.

Antes de la fabricación de los hormigones, se han determinado las características de aquellos materiales que han sido necesarios para llevar a cabo este estudio. Para ello, se han realizado diversos ensayos de granulometría, densitometría y de inspección visual.

Llegados a este punto, se describe el proceso de hormigonado efectuado y los métodos que se han empleado en el diseño de las mezclas justificando su uso. Para ello, se ha establecido un criterio de dosificación que, basado en la consecución de hormigones resistentes, tiene como objetivo primordial obtener un hormigón compacto y trabajable.

A partir de aquí, se han fabricado dichas mezclas obteniendo diversos tipos de hormigones de los que se han realizado diversos ensayos de nivel físico y mecánico.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Como ya se sabe, el hormigón es, esencialmente, el material resultante de una mezcla íntima y homogénea de áridos finos, áridos gruesos, un aglomerante y agua en las debidas proporciones para que pueda fraguar y endurecer de manera óptima. Además, en el momento de su amasado, puede añadírsele otros productos o materiales para mejorar alguna de sus características determinadas. Las propiedades de dicho material resultante, por tanto, dependerán en gran medida de las propiedades de sus elementos constituyentes así como del diseño de las mezclas en el proceso de dosificación.

Por todo esto, es fundamental conocer las características más relevantes de cada uno de los elementos que se van a utilizar. En el caso de los áridos, es necesario realizar una serie de ensayos de caracterización que las determinen. Es importante añadir que, dichos ensayos, han seguido lo indicado en las normas: UNE-EN 932-1 [56], UNE-EN 1097-6 [31], UNE-EN 933-1 [58] y UNE- EN 933-11 [59].

A continuación, se muestran las propiedades más relevantes de dichos elementos constituyentes así como los procesos para obtenerlas en el caso concreto de los áridos.

3.2.1 CEMENTO

Como mero recordatorio, se denomina cemento a aquel conglomerante hidráulico (natural o artificial) que, convenientemente amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece a causa de las reacciones de hidrólisis e hidratación de sus constituyentes, dando lugar a un producto hidratado mecánicamente resistente y estable tanto al aire como bajo agua [(7)].

El tipo de cemento utilizado en el estudio experimental es un CEM I 42.5 N/R que proviene de una de las plantas cercanas a la ciudad de Barcelona de la compañía CEMEX S.A.B. [(60)]. Las características proporcionadas del material por dicha planta coinciden con las especificaciones de la UNE-EN 197-1:2000 [(61)] mostradas en la tabla 3.1 siguiente:

Tabla 3.1 Características del cemento CEM I 42,5 N/R

	UNE-EN 197-1: 2000 (%)
Componentes	
Clinker	95 - 100
Componentes minoritarios	0 - 5
Características Químicas	
Anhídrido Sulfúrico, SO_3	≤ 3,5
Cloruros, Cl^-	≤ 0,1
Pérdida por Calcinación	≤ 5,0
Residuo insoluble	≤ 5,0
C. Adicionales Clinker	**UNE 80303-1**
Aluminato tricálcico (C_3A)	≤ 5,0
Aluminato tricálcico + ferrito aluminato tetracálcico (C_3A+C_4AF)	≤ 22,0

3.2.2 AGUA

El agua que se añade a la mezcla, junto a los demás componentes del hormigón, tiene como objetivo:

1. Hidratar los componentes activos del cemento.

2. Actuar como lubricante haciendo posible que la masa sea trabajable.

3. Crear espacio en la pasta para los productos resultantes de la hidratación del cemento.

El artículo 27 de la EHE-08 [23], determina que el agua utilizada, tanto para el amasado como para el curado del hormigón, no debe contener ninguna sustancia perjudicial en cantidades tales que afecten a las propiedades del hormigón. Asimismo, se pueden emplear todas las aguas sancionadas como aceptables por la práctica.

Un índice útil sobre la aptitud de un agua es su potabilidad. De esta manera, el agua que se ha utilizado proviene de la red de abastecimiento de Barcelona, ya que se considera apta para el consumo humano.

3.2.3 ÁRIDO CONVENCIONAL

En el diseño de las mezclas de hormigón se han utilizado dos tipos de áridos: grava y arena, ambos naturales y procedentes de rocas sedimentarias (calcáreas).

3.2.3.1 Inspección visual

Debido a que los áridos convencionales para la fabricación de los hormigones han estado almacenados en la intemperie en diferentes big-bags, ha sido necesario realizar una inspección visual de los mismos para comprobar que no haya impurezas que puedan contaminarlos variando así las propiedades del hormigón a constituir. La inspección visual es un tipo de ensayo no destructivo que consiste en determinar e identificar los diferentes elementos que componen un material a través de una visión directa (en este caso, sin ayuda de equipos de inspección y registro).

Cabe destacar que, en la capa más superficial de los sacos de ambos materiales, se han encontrado numerosos elementos orgánicos (hojas de árbol) debido a que la zona de almacenamiento está cubierta por la copa de algunos árboles que han ido perdiendo sus hojas por efecto del viento. Por este motivo, a la hora de seleccionar el material, se ha descartado dicha capa a fin de no alterar las propiedades finales de los hormigones a fabricar.

3.2.3.2 Determinación de la densidad de partículas y el coeficiente de absorción

Para establecer la densidad de los áridos convencionales y su coeficiente de absorción se ha recurrido a la norma UNE-EN 1097-6 [31]. Dicha norma, a pesar de establecer el uso del método del picnómetro sobre áridos de fracciones comprendidas entre 0,063 y 31,5 mm (valores que comprenden tanto la arena como la grava utilizada), la práctica incita a restringir dicho método a áridos de granulometría dentro del rango de 4 a 0,063 mm para una mayor conservación de los picnómetros. Por este motivo, se ha determinado el uso del ensayo de la balanza hidrostática para la grava y el uso del método del picnómetro para la arena.

Es importante destacar que, ambos ensayos, tienen por objeto determinar la densidad de las partículas y la absorción de agua de los áridos mediante una relación entre la masa y el volumen.

Como recordatorio, tal y como se detalla en la norma UNE-EN 1097-6, se define *densidad aparente de partículas* ρ_a a la relación entre la masa de una muestra de árido secado en estufa y el volumen que ocupa en agua, con inclusión de los huecos interiores estancos y los huecos accesibles al agua. Por otro lado, se define *densidad de partículas tras secado en estufa* ρ_{rd} a la relación entre la masa de una muestra de árido seco en estufa y el volumen que ocupa en el agua, con inclusión de los huecos interiores estancos y con exclusión de los huecos accesibles al agua. Asimismo, se define *densidad de partículas con saturación y secado de la superficie del árido* ρ_{ssd} a la relación entre la masa combinada de una muestra y la masa de agua contenida en los huecos accesibles al agua y el volumen que ocupa la muestra en agua.

Por otra parte, para definir el coeficiente de absorción, es necesario recordar que la *absorción de agua* es el incremento de la masa de una muestra seca en estufa debido a la penetración de agua en los huecos accesibles.

3.2.3.2.1 Método de la balanza hidrostática:

Para proceder con dicho ensayo, la norma indica que es fundamental una preparación previa de los materiales, en este caso la grava. Ésta consiste, en primer lugar, en obtener un determinado peso en función del tipo de árido para que se considere como muestra representativa. Para ello y mediante aparatos de muestreo (cuarteadores), se consigue reducir la muestra bruta almacenada inicialmente en sacos (big-bags) a 2 muestras representativas del peso que se indica en las especificaciones. Una vez hecho esto, se colocan en bandejas.

Tras realizar esto, en una cesta metálica y sujetada por una balanza, se coloca el árido y se sumerge la muestra. Es importante eliminar las posibles burbujas de aire contenidas en la muestra levantando y dejando caer la cesta para que no se alteren los resultados. Se anota la masa aparente en el agua de la cesta con el árido saturado (M_2).

Una vez determinada la pesada hidrostática, se extrae la cesta con el árido y se deja escurrir durante varios minutos. A continuación, la muestra se expande sobre unos paños absorbentes, eliminando manualmente la película de agua que recubre las partículas buscando las condiciones de superficie seca para, posteriormente, pesar el árido anotando su masa en condiciones saturadas con superficie seca (M_1).

Por otro lado, se vuelve a poner la cesta vacía sumergida en agua y, tras sacudirla para eliminar las burbujas de aire, se anota su peso sumergido en agua (M_3)

Una vez aquí, las muestras se introducen de nuevo en una estufa a una temperatura de 110 ± 5 ºC durante 24 horas hasta la obtención de masa constante, anotando el peso seco (M_4).

Para calcular las respectivas densidades de partículas se ha recurrido a las siguientes expresiones tal y como se indican en la normativa mencionada.

Para el cálculo de la densidad aparente ρ_a se ha utilizado la siguiente expresión:

$$\rho_a = \rho_w \cdot \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$$

donde ρ_w es la densidad del agua (Mg/m^3), M_4 es la masa de la muestra de ensayo secado en estufa, pesado al aire (gr), M_2 es la masa aparente en el agua de la cesta que contiene la muestra de árido saturado (gr) y M_3 es la masa aparente en el agua de la cesta vacía (gr)

Por otro lado, para calcular la densidad de partículas tras secado de estufa ρ_{rd} se ha utilizado la siguiente ecuación:

$$\rho_{rd} = \rho_w \cdot \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

donde ρ_w es la densidad del agua (Mg/m^3), M_4 es la masa de la muestra de ensayo secado en estufa, pesado al aire (gr), M_1 es la masa de árido saturado y con la superficie seca, pesada al aire (gr), M_2 es la masa aparente en el agua de la cesta que contiene la muestra de árido saturado (gr) y M_3 es la masa aparente en el agua de la cesta vacía (gr)

Para calcular la densidad de partículas saturadas con superficie seca ρ_{ssd} se ha recurrido a lo siguiente:

$$\rho_{ssd} = \rho_w \cdot \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

donde ρ_w es la densidad del agua (Mg/m^3), M_1 es la masa de árido saturado y con la superficie seca, pesada al aire (gr), M_2 es la masa aparente en el agua de la cesta que contiene la muestra de árido saturado (gr) y M_3 es la masa aparente en el agua de la cesta vacía (gr)

Por último, para calcular el coeficiente de absorción de la grava:

$$WA_{24h} = 100 \cdot \frac{(M_1 - M_4)}{M_4}$$

donde M_1 es la masa de árido saturado y con la superficie seca, pesada al aire (gr) y M_4 es la masa de la muestra de ensayo secado en estufa, pesado al aire (gr)

Cabe destacar que todos los resultados obtenidos son los valores medios de 2 muestras representativas de la grava que se ha utilizado para el desarrollo de esta tesis.

3.2.3.2.2 Método del picnómetro

De igual manera al método de la balanza hidrostática, la norma establece la misma preparación previa para realizar el ensayo del picnómetro, en este caso con la arena como material. Es importante destacar que, el peso representativo de las muestras, será diferente al caso de la grava siguiendo las indicaciones de la norma.

Preparadas las dos muestras representativas y colocadas en bandejas, se sumergen en agua durante unas 24 horas para conseguir saturarlas. Es importante que en esta operación quede una capa suficientemente gruesa de agua entre su lámina libre y las partículas más superficiales de la muestra. De esta manera, se garantiza que en todo momento la arena no entre en contacto con el aire exterior durante procesos de traslado o movimientos bruscos de bandejas.

Una vez pasado este tiempo, se filtra cada muestra saturada por un tamiz de luz de malla de 0,063 mm con el fin de eliminar las partículas más finas. A partir de aquí, es necesario secar las muestras de arena para conseguir la condición de saturación en superficie seca. Esta operación se hace mediante una corriente de aire caliente (secador) cubriendo la muestra con un plástico y enfocando el chorro de aire caliente por debajo para evitar perder parte de las partículas.

Para valorar la adecuada eliminación de la película de agua, se emplea un molde troncocónico. El proceso consiste en ir secando la muestra progresivamente y llenar dicho molde cuando las condiciones parecen ser las adecuadas. El proceso de llenado se realiza en 3 tongadas aplicando una fuerza de compactación con un pisón mediante el golpeo del mismo 8 veces por operación. Si al levantar el molde el árido mantiene la forma, se debe proseguir con el secado. Se ha de repetir esta operación hasta conseguir que la pirámide formada de arena se desmorone casi por completo.

Una vez se ha llegado a la condición de saturación con superficie seca, se pesa en una balanza y se introduce en un picnómetro donde se puede proceder al pesaje del mismo con agua y con la muestra. En esta operación, es necesario voltear el picnómetro de manera enérgica para eliminar las burbujas contenidas entre las partículas de la muestra de árido que puedan introducir errores de pesaje.

Para calcular las respectivas densidades de partículas se ha recurrido a las siguientes expresiones tal y como se indican en la normativa mencionada.

Para el cálculo de la densidad aparente ρ_a se ha utilizado la siguiente expresión:

$$\rho_a = \rho_w \cdot \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$$

donde ρ_w es la densidad del agua (Mg/m^3), M_4 es la masa de la muestra de ensayo secada en estufa, pesada al aire (gr), M_2 es la masa del picnómetro que contiene la muestra de árido saturado (gr) y M_3 es la masa del picnómetro relleno de agua únicamente (gr).

Por otro lado, para calcular la densidad de partículas tras secado de estufa ρ_{rd} se ha utilizado la siguiente ecuación:

$$\rho_{rd} = \rho_w \cdot \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

donde ρ_w es la densidad del agua (Mg/m^3), M_4 es la masa de la muestra de ensayo secada en estufa, pesada al aire (gr), M_1 es la masa de árido saturado y con la superficie seca, pesada al aire (gr), M_2 es la masa del picnómetro que contiene la muestra de árido saturado (gr) y M_3 es la masa del picnómetro relleno de agua únicamente (gr).

Para calcular la densidad de partículas saturadas con superficie seca ρ_{ssd} se ha recurrido a lo siguiente:

$$\rho_{ssd} = \rho_w \cdot \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

donde ρ_w es la densidad del agua (Mg/m^3), M_1 es la masa de árido saturado y con la superficie seca, pesada al aire (gr), M_2 es la masa del picnómetro que contiene la muestra de árido saturado (gr) y M_3 es la masa del picnómetro relleno de agua únicamente (gr).

Por último, para calcular el coeficiente de absorción de la arena:

$$WA_{24h} = 100 \cdot \frac{(M_1 - M_4)}{M_4}$$

donde M_1 es la masa de árido saturado y con la superficie seca, pesada al aire (gr) y M_4 es la masa de la muestra de ensayo secado en estufa, pesado al aire (gr)

Cabe destacar que todos los resultados obtenidos son los valores medios de 2 muestras representativas de la grava que se ha utilizado para el desarrollo de esta tesis.

A continuación, se muestran algunas figuras que muestran algunas fases de dicho ensayo:

Cuarteo de material hasta obtener dos muestras representativas

Lavado de arena por malla 0,063 mm para eliminar las partículas finas

Figura 3.1 Fase de preparación previa al ensayo

Eliminación de la película de agua en la superficie de la arena a través de la comprobación en molde troncocónico y pesado de muestra en picnómetro para obtener M_2

Figura 3.2 Fase de ensayo por el método del picnómetro

3.2.3.3 Determinación de la granulometría

Para determinar la granulometría de los áridos convencionales utilizados, se ha recurrido a las especificaciones de la norma UNE-EN 933-1 [58]. Esencialmente, el ensayo consiste en dividir y separar, mediante una serie de tamices, el material en varias fracciones granulométricas de tamaño decreciente. Los tamaños de abertura y el número de tamices se han de seleccionar según la naturaleza de la muestra y según la precisión requerida. Cabe mencionar que, dicho ensayo, se ha realizado de forma independiente para los diferentes tipos de áridos utilizados y que, para ejecutarlo, se ha recurrido al procedimiento de la vía húmeda tal y como se indica en la norma mencionada.

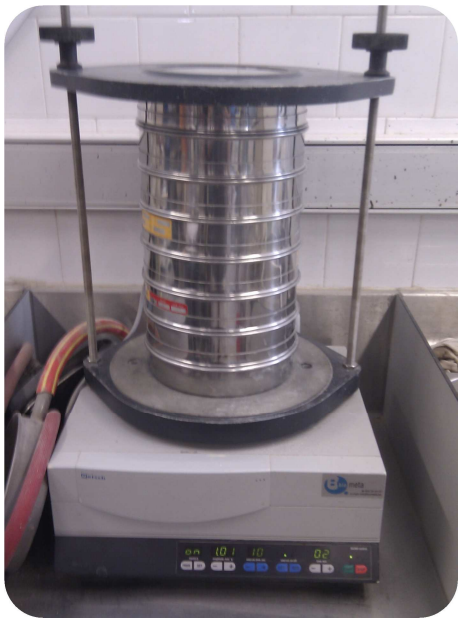
La norma indica que, para llevarlo a cabo, es fundamental una preparación previa de los materiales. Ésta consiste en, primer lugar, obtener un determinado peso en función del tipo de árido para que se considere como muestra representativa. Para ello y mediante aparatos de muestreo (cuarteadores), se consigue reducir la muestra bruta almacenada inicialmente en sacos (big-bags) a 2 muestras representativas (para cada tipo de árido) del peso que se indica en las especificaciones. Una vez hecho esto, se colocan en bandejas y se someten a un proceso de secado en un horno a una temperatura de 110 ± 5 ºC durante 24 horas hasta conseguir una masa constante. Pasado el tiempo indicado, se procede al pesaje de los materiales secos y se dejan en remojo durante otras 24 horas para conseguir una suspensión, dispersión y disgregación completa de los finos adheridos a las partículas que en ocasiones forman terrones.

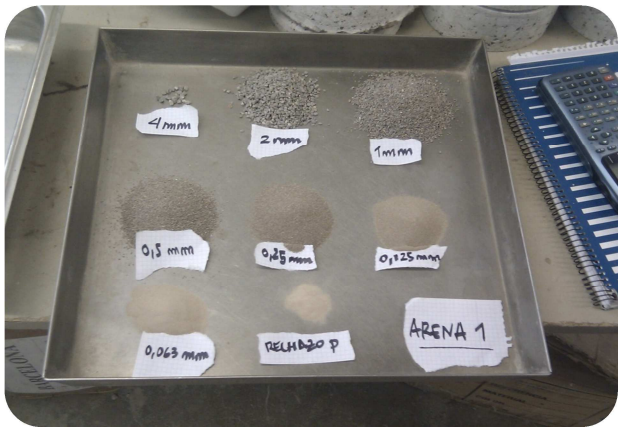
A partir de aquí, se procede a eliminar los finos mediante un proceso de lavado de los mismos con agua corriente a través de un tamiz normalizado de 0,063 mm después del cual se secan de nuevo en estufa a 110 ± 5 ºC durante otras 24 horas. Llegados a este punto, se pesa el total de la muestra en una balanza y se procede al tamizado mediante una máquina tamizadora RETSCH AS300 durante un total de 4 min a intervalos de 20 segundos y bajo una amplitud de 1,00 mm/g tal y como es habitual en la praxis del laboratorio.

Después del tamizado se pasa a determinar el peso retenido en cada uno de los tamices y el porcentaje de finos del material a través de la diferencia entre el peso inicial y el final después de sumar todos los pesos retenidos.

Para cada una de las fracciones tamizadas se obtienen, la granulometría, el diámetro máximo y el módulo de finura.

A continuación, se muestran algunas figuras que muestran algunas fases de dicho ensayo:





Tamizado de muestras por máquina RETSCH AS300 y composición por fracciones granulométricas de la arena tras el tamizado.

Figura 3.3 Fase de ensayo granulométrico

3.2.4 ÁRIDO RECICLADO AR-CJF

Como ya se ha comentado, se entiende como árido reciclado al resultante del procesamiento de materiales inorgánicos utilizados previamente como materiales de construcción. Este material, se obtiene por tanto, a partir de los materiales pétreos generados como residuo durante los procesos de construcción y/o de demolición.

El árido reciclado que se ha utilizado en el estudio procede de la trituración de probetas de hormigón, que han sido almacenadas en el laboratorio de la universidad. La trituración se ha llevado a cabo mediante una trituradora de mandíbulas, y se ha determinado la necesidad de dos pasadas por el mecanismo para que la obtención de los tamaños y formas sean las óptimas.

3.2.4.1 Inspección visual

Uno de los principales problemas de los áridos reciclados radica en que frecuentemente pueden incorporar impurezas y contaminantes que pueden influir negativamente en las propiedades del hormigón a constituir. Es por esto que es necesario caracterizar la composición del árido reciclado recurriendo a la norma UNE- EN 933-11 [59]. La norma establece un test que consiste en separar las partículas de material reciclado en seis clases diferentes: materiales bituminosos, mampostería, hormigón y materiales cementíticos, partículas ligeras, material sin ligantes y otros.

3.2.4.2 Determinación de la densidad de partículas y el coeficiente de absorción

Para determinar la densidad y la absorción del árido reciclado se han seguido las mismas directrices ya comentadas en el árido convencional. Cabe destacar que, debido al tamaño de las partículas de árido reciclado, se ha utilizado el método de la balanza hidrostática para realizarlo.

3.2.4.3 Determinación de la granulometría

Para determinar la granulometría del árido reciclado se ha seguido la misma metodología que en el caso del árido convencional.

3.2.5 ADITIVOS

Se entiende por aditivos aquellas sustancias o productos que, incorporados al hormigón antes del amasado (o durante el proceso de fabricación) en una proporción no superior al 5% del peso del cemento [23], producen una variación deseada, en estado fresco o endurecido, de alguna de las características, propiedades habituales o comportamiento del hormigón producido [7].

Para el desarrollo de esta tesis, en algunos de los hormigones que se han fabricado, se ha utilizado el aditivo superplastificante/reductor de agua de alta actividad GLENIUM SKY 604. Éste se caracteriza por, sin modificar el contenido de agua, aumentar considerablemente el asiento y el escurrimiento del hormigón fresco, mejorando así su trabajabilidad.

Cabe destacar que, el reductor de agua de alta actividad, se ha agregado al hormigón durante la última fase del mezclado y con una pequeña parte del agua total de amasado (tal y como se indica en las especificaciones técnicas del producto) dependiendo siempre de la consistencia observada durante dicho proceso. Por esta razón, a veces, ha resultado difícil determinar la cantidad exacta de aditivo a añadir para conseguir la consistencia deseada (blanda-fluida para poder compactarlo de manera óptima con los recursos de los que dispone el laboratorio). No obstante, en todos los casos, se ha intentado seguir la relación de dosificación habitual recomendada por las especificaciones (0,30 – 1,0 % sobre el peso de cemento).

3.3 FABRICACIÓN DE LOS HORMIGONES

Para el desarrollo de esta tesis, se han fabricado 3 tipos de hormigón de características diferentes. Partiendo de que la EHE-08 considera como hormigones de características ordinarias a aquellos que están comprendidos entre el rango de relación agua/cemento 0,45- 0,60, se ha determinado considerar, por cada tipo de hormigón fabricado, ambas relaciones para abarcar los extremos de esta clasificación. Los hormigones ejecutados son:

1. Hormigón convencional (HC) con relación agua/cemento 0,45 y 0,60.

2. Hormigón con árido reciclado en el que se sustituye un 20% en peso de árido reciclado por árido grueso natural (HR 20%) con relación agua/cemento 0,45 y 0,60.

3. Hormigón con árido reciclado en el que se sustituye un 20% en peso de árido reciclado por árido grueso natural (HR EMV 20%) adaptando las directrices del método E.M.V. con relación agua/cemento 0,45 y 0,60.

Aunque ya se profundizará más adelante, es importante destacar que todos los hormigones han sido fabricados partiendo del mismo método de dosificación para poder compararlos: el método de Bolomey.

A continuación, se muestra en la tabla 3.2 la cantidad de probetas fabricadas y el destino que se le ha dado a las mismas.

Tabla 3.2 Número de probetas por ensayo a realizar para cada tipo de hormigón

	HC 0,45	**HC 0,60**	**HR 20% 0,45**	**HR 20% 0,60**	**HR EMV 20% 0,45**	**HR EMV 20% 0,60**
Propiedades Físicas						
Densidad seca	3	3	3	3	3	3
Propiedades Mecánicas						
Ensayo de compresión	3	3	3	3	3	3
Módulo Elástico	3	3	3	3	3	3
TOTALES						
	9	9	9	9	9	9

3.3.1 PROCESO DE FABRICACIÓN

A continuación, se describe el proceso de fabricación de los hormigones comentados. Su criterio de fabricación ha sido el mismo en todos ellos, variando su composición (dosificaciones diferentes) de acuerdo con cada tipo de hormigón a fabricar. Cabe destacar que dicho proceso ha seguido las directrices que se aplican habitualmente en el departamento de ingeniería de la construcción de la universidad.

3.3.1.1 Dosificación

El estudio de la dosificación de un hormigón consiste en determinar la mezcla óptima de los distintos materiales disponibles 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 la construcción de una obra o parte de ella.

En el desarrollo de esta tesis, se ha utilizado el método de Bolomey que se caracteriza por ser un método de gran tradición en la enseñanza de la universidad y de fácil aplicación.

En el caso de la fabricación del hormigón convencional y el hormigón reciclado con un 20% de sustitución de árido reciclado, se ha aplicado directamente dicho método para ambas relaciones agua/cemento. En el caso de la fabricación del hormigón reciclado con un 20% de sustitución de árido reciclado siguiendo las directrices del método E.M.V., se ha realizado una conversión del método E.M.V. basado en el método A.C.I. adaptándolo al método Bolomey en ambas relaciones agua/cemento.

Cabe destacar que el criterio de dosificación que se ha seguido, basado en la consecución de hormigones resistentes, tiene como objetivo obtener un hormigón compacto y trabajable.

3.3.1.2 Preparación de los materiales

Para la preparación de los áridos es necesario someterlos previamente a un proceso de secado en un horno a una temperatura de 110 ± 5 ºC durante 24 horas hasta conseguir una masa constante. De esta manera, se elimina la posibilidad de que los áridos tengan un cierto contenido de agua que pueda interferir a la hora de fabricar el hormigón al modificar su relación agua/cemento.

Los áridos ya secos y a temperatura ambiente, se colocan dentro de varios capazos y se pesan con una báscula de precisión cumpliendo con las especificaciones de su dosificación. Una vez pesados, se colocan en bidones y se añade el agua de absorción correspondiente a cada tipo de árido para no modificar la relación agua/cemento del hormigón a fabricar. Este proceso consiste en añadir, con un pulverizador, el agua necesaria ya calculada para que el árido alcance la condición saturada en superficie seca. El mecanismo consiste en remover bien los áridos para que el agua se distribuya uniformemente. Una vez hecho esto, se sellan los bidones mediante una arandela metálica y se dejan almacenados hasta su día de fabricación.

Es importante destacar que, previo al proceso de amasado se mide la temperatura y humedad relativa del ambiente. También se mide la temperatura inicial del hormigón durante el periodo de reposo (3 minutos entre amasadas) y tras los 2 últimos minutos de amasado se mide su temperatura final.

A continuación, se muestran algunas figuras que muestran la preparación de los materiales llevada a cabo:

Llenado de áridos en bidones tras dejarlos enfriar después de estar 24 horas en estufa y una vez colocados, tras pesado, adición de agua de absorción (con pulverizador) para no alterar la relación a/c del hormigón a fabricar.

Figura 3.4 Fase de preparación de materiales

3.3.1.3 Amasado

El proceso de amasado tiene por finalidad recubrir los áridos mediante una capa de pasta de cemento y mezclar todos los componentes hasta conseguir una masa uniforme. Para llevar a cabo este procedimiento, se han seguido las directrices habituales adoptadas en el laboratorio del departamento de ingeniería de la construcción de la universidad

Humedeciendo el interior del tambor de la hormigonera, se añaden los áridos de mayor tamaño con una pequeña cantidad del agua de amasado. Posteriormente, se pone en funcionamiento la hormigonera dando 2 vueltas para que los áridos se extiendan uniformemente en el recipiente que los contiene. A continuación, se para la amasadora y se añaden los elementos más finos del hormigón: árido fino y cemento. Con la hormigonera de nuevo en marcha, se va añadiendo despacio el agua restante dejando una pequeña cantidad si se tiene en cuenta añadir un aditivo posteriormente. El amasado se realiza en 3 fases: 3 minutos de amasado, 3 minutos de reposo y 2 minutos más de amasado. La duración del amasado debe ser el suficiente para conseguir una mezcla íntima y homogénea de los distintos componentes. En el caso de incorporar el aditivo, se añade disuelto en una pequeña cantidad del agua de amasado reservada al iniciarse los 2 últimos minutos de amasado.

Es importante destacar que, previo al proceso de amasado se mide la temperatura y humedad relativa del ambiente. También se mide la temperatura inicial del hormigón durante el periodo de reposo (3 minutos entre amasadas) y tras los 2 últimos minutos de amasado se mide su temperatura final.

A continuación, se muestran algunas figuras que muestran la fase de amasado de algunos de los hormigones llevada a cabo:

Figura 3.5 Fase de amasado del hormigón fabricado

3.3.1.4 Llenado, compactación y conservación de probetas

Antes de esto, es fundamental la preparación previa de los moldes metálicos en los que se va a endurecer el hormigón durante las primeras 24 horas de vida. Para ello, es necesario comprobar que todos los moldes están bien fijados y que sus paredes y bases están impregnadas de aceite para facilitar su posterior desmolde. Es importante destacar que, para el desarrollo de esta tesis, se han utilizado moldes metálicos cilíndricos de dimensiones 10x20 cm.

Hechas las comprobaciones y una vez amasado, se debe comprobar la consistencia del hormigón fresco obtenido. Esto es de vital importancia ya que, en función del tipo de consistencia, la norma UNE-EN 12390-2 [62] establece un método distinto de compactación.

Tras dicha prueba, se debe introducir el hormigón fabricado en los moldes y compactarlo a fin que, durante las primeras 24 horas, el hormigón endurezca e inicie su proceso de curado. La compactación se efectúa inmediatamente después del vertido del hormigón en los moldes de tal forma que se obtenga una compactación completa sin una excesiva segregación y exudación.

3.3.2 PROPIEDADES MEDIDAS

Los ensayos planificados para este estudio son, para el hormigón fresco: la medida de la consistencia y la temperatura y para el hormigón endurecido: ensayos de compresión, módulo de elasticidad y determinación de su densidad sólida. Es importante destacar, que los ensayos sobre el hormigón endurecido se han hecho a la edad de 28 días.

3.3.2.1 Hormigón fresco

Se denomina hormigón fresco al que, por poseer plasticidad, tiene la facultad de poder moldearse. El hormigón fresco posee una vida que está comprendida entre el momento en que abandona la amasadora u hormigonera y el momento en que se inicia el fraguado del cemento; esta vida es variable, ya que depende de muchos factores como el tipo de cemento, la relación agua/cemento, la temperatura, uso de aditivos, etc [7].

3.3.2.1.1 Consistencia

La consistencia es la mayor o menor facilidad que tiene el hormigón fresco para deformarse y consiguientemente para ocupar todos los huecos del molde o encofrado [7]. Influyen en ella distintos factores, especialmente la cantidad de agua de amasado, pero también el tamaño máximo del árido, la forma de los áridos y su granulometría.

Para medir la consistencia del hormigón se realiza el llamado cono de Abrams de acuerdo con la norma UNE-EN 12350-2 [63]. Consiste en llenar un molde metálico de forma troncocónica de 30 cm de altura en tres tongadas de igual altura de hormigón cada una compactándolas con una barra de hierro mediante 25 golpes. Una vez se ha llenado todo el molde y realizadas las 3 compactaciones, se enrasa al nivel superior y se procede a retirar el molde verticalmente. La consistencia se obtiene midiendo la distancia entre el punto medio de la capa superior del hormigón y el borde superior del molde troncocónico en cm.

En función de este descenso, se puede definir la consistencia del hormigón según los valores de la siguiente tabla, así como sus formas de compactación:

Tabla 3.3 Consistencias y formas de compactación [23]

Consistencia	Asiento Cono de Abrams (cm)	Forma de compactación
Seca (S)	0 a 2	Vibrado enérgico en taller
Plástica (P)	3 a 5	Vibrado enérgico en obra
Banda (B)	6 a 9	Vibrado a apisonado
Fluida (F)	10 a 15	Picado con barra
Líquida (L)	16 a 20	No apta para elementos resistentes, salvo que esta consistencia se obtenga mediante el empleo de aditivos superplastificantes

A continuación, se muestran algunas figuras que muestran como se ha llevado a cabo el ensayo de consistencia en el hormigón fresco:

Instrumentación necesaria para realizar el ensayo de consistencia en el hormigón fresco fabricado y ensayo del cono de Abrams con cono troncocónico metálico.

Figura 3.6 Ensayo de consistencia del hormigón fresco

3.3.2.1.2 Temperatura

Es de sobra conocida la gran influencia de la temperatura ambiente en el comportamiento del hormigón y las precauciones que se deben tomar en situaciones extremas tanto en el proyecto como en su amasado, transporte y puesta en obra y curado.

La medición de la temperatura del hormigón fresco se ha determinado realizarse con un termómetro digital. Las medidas se tomarán durante el periodo de reposo (temperatura inicial hormigón) y tras los 2 últimos minutos de amasado (temperatura final del hormigón).

3.3.2.2 Hormigón endurecido

Se define como hormigón endurecido al que no cumple con la definición de hormigón fresco, es decir, al que se caracteriza por su dureza y rigidez que se produce cuando ha terminado el proceso de fraguado [(7)].

3.3.2.2.1 Propiedades físicas

Las propiedades físicas dependen de la estructura y procesamiento del material. Describen características que generalmente no se alteran por fuerza que actúan sobre el material.

3.3.2.2.1.1 Densidad

La densidad se ha determinado de acuerdo con la norma UNE-83-312-90 [(64)]. Para ello, se necesita una balanza capaz de funcionar como hidrostática y equipada con una cesta para pesar la muestra sumergida en agua.

Cumplidos los 28 días, se retiran las muestras de la cámara húmeda destinadas a este ensayo (3 probetas por tipo de hormigón fabricado) y se realizan 4 cortes por probeta con un disco radial dejando 3 rebanadas regulares intermedias de, aproximadamente, espesor 5 cm. Se escoge la rebanada intermedia de cada testigo y se marcan adecuadamente. El resto de material se desecha o se guarda en la cámara para futuros usos.

A continuación, se introducen en un recipiente conectado a una máquina que permite conseguir las condiciones de vacío. A pesar de que la máquina permite llegar a dichas condiciones en pocas horas, por seguridad se dejan las muestras durante unas 24 horas. Una vez pasado este tiempo, se introduce por una válvula, gracias a la diferencia de presión atmosférica, agua en el recipiente hasta cubrir por completo las muestras y se dejan las muestras sumergidas durante otras 24 horas.

Tras 24 horas, se trasladan las muestras a la balanza hidrostática y se pesan con el uso de una cesta sumergiéndolas completamente en agua. Tras este pesado, se secan las muestras con un paño hasta conseguir las condiciones de saturación con superficie seca y se vuelven a pesar en una balanza al exterior.

A continuación, se someten dichas muestras a un proceso de secado en una estufa a una temperatura de 110 ± 5 ºC durante 24 horas hasta conseguir una masa constante. Tras el secado, se pesan de nuevo las muestras en una balanza exterior.

Para calcular la densidad seca de cada tipo de hormigón, se hace la media de las 3 densidades secas obtenidas por cada muestra. Para calcular cada densidad, se ha seguido la siguiente expresión:

$$\rho_a = \rho_w \cdot \frac{M_1}{M_2 - M_3}$$

donde ρ_w densidad del agua (Mg/m^3), M_1 es el peso sumergido de la muestra (gr), M_2 el peso de la muestra en condiciones saturadas con superficie seca (gr) y M_3 el peso seco de la muestra tras estufa (gr).

A continuación, se muestran algunas figuras que muestran como se ha llevado a cabo el ensayo de densidad sólida en el hormigón endurecido:

Figura 3.7 Determinación de la densidad sólida de los hormigones fabricados tras 28 días

3.3.2.2.2 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas son las que describen la forma en que un material soporta fuerzas aplicadas, incluyendo fuerzas de tensión, compresión, impacto, cíclicas o de fatiga, o fuerzas a altas temperaturas. A continuación, se describen los ensayos mecánicos realizados.

3.3.2.2.2.1 Ensayo de rotura por compresión

Para realizar dicho ensayo, se ha seguido con lo que se especifica en la norma UNE 83-304-84 [(65)]. En ella queda determinado el uso de una prensa que debe estar provista de un sistema de regulación de cargas que puedan ir aumentando de forma progresiva y continua hasta alcanzar el punto de rotura de la probeta a ensayar.

La prensa que se ha utilizado se caracteriza por disponer de dos caras de un cierto espesor de acero y de superficie regular. Adicionalmente, se puede añadir algún soporte metálico a la cara inferior para ajustar la distancia entre caras. El espesor de los soportes debe asegurar en todo momento la indeformabilidad durante el transcurso del ensayo.

Debido a que la probetas a ensayar son de geometría cilíndrica y durante el proceso de fabricación la cara superior de las mismas no ha quedado totalmente regular al estar totalmente libres, es necesario refrentar dichas caras mediante mortero de azufre tal y como se indica en la norma ISO 3310-1.

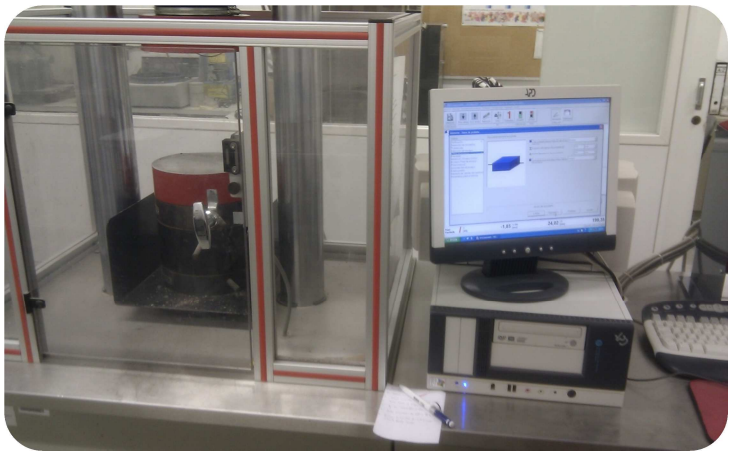
Tras la preparación de las probetas, se colocan individualmente en la prensa y se procede con el ensayo. El ensayo consiste en aplicar una carga uniforme y continua, de manera que el aumento de tensión media sobre la probeta sea de 5 ± 2 kp/cm^2/s (0.5 ± 2 MPa/s). La carga se aplica sin variación hasta que la probeta se deforme rápidamente antes de la rotura. Se toma como carga de rotura la máxima alcanzada. Para obtener la carga de rotura de cada tipo de hormigón se hace la media de las 3 muestras destinadas a dicho ensayo.

3.3.2.2.2.2 Determinación del módulo de elasticidad en compresión

Para determinar el módulo de elasticidad se han seguido las indicaciones de la norma UNE 83-316-96 [(66)]. Para ello, es necesaria una prensa que cumpla con las especificaciones del ensayo anterior. Adicionalmente, se han usado instrumentos para medir los cambios de longitud, teniendo una base de medida no menor de dos tercios del diámetro de la probeta de ensayo y que permita su colocación de tal forma que los puntos de medida sean equidistantes con las caras de la probeta y a una distancia no menor de un cuarto de la altura de la misma.

Tras la obtención de los valores de resistencia mecánica a compresión, se aplican 3 ciclos de carga hasta un tercio del valor de la tensión de rotura por compresión obtenida. La tensión se incrementa uniformemente a una velocidad de 0.5 ± 0.2 N/mm^2/s hasta ese valor, en el que se mantiene durante 60 segundos y se registra la deformación medida, tomando las deformaciones del límite inferior y el límite de carga superior con lecturas en intervalos de 30 segundos. Para obtener el módulo de elasticidad de cada tipo de hormigón se hace la media de las 3 muestras destinadas a este ensayo.

A continuación, se muestran algunas figuras que muestran como se ha llevado a cabo el ensayo de determinación del módulo de elasticidad en compresión:



Prensa que cumple las especificaciones de la normativa para realizar el ensayo de módulo de elasticidad en compresión y probeta durante dicho ensayo con la instrumentación necesaria colocada para medir las deformaciones

Figura 3.8 Ensayo de módulo de elasticidad en compresión

Capítulo 4

Resultados y discusiones

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se muestran y se discuten los resultados obtenidos en los ensayos que se han planificado para este estudio. Es importante recordar que se han realizado pruebas de caracterización de los materiales utilizados (inspección visual, densitometría, absorción y granulometría), así como ensayos en estado fresco del hormigón fabricado (consistencia) y en estado endurecido tras 28 días almacenados en una cámara húmeda (densidad sólido, resistencia y módulo de elástico). Por otro lado, también se detalla el proceso de dosificación llevado a cabo a la hora de diseñar las mezclas en la fase experimental.

4.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en cuanto a la caracterización de los materiales que se han utilizado para el desarrollo de esta tesis durante la fase experimental.

Cabe recordar que se han utilizado dos tipos de áridos convencionales: grava y arena, ambos naturales y procedentes de rocas sedimentarias (calcáreas), y un árido reciclado procedente de la trituración de probetas de hormigón, que han sido almacenadas en el laboratorio de la universidad.

4.2.1. Inspección visual

La inspección visual es un tipo de ensayo no destructivo que consiste en determinar e identificar los diferentes elementos que componen un material a través de una visión directa (en este caso, sin ayuda de equipos de inspección y registro).

4.2.1.1 Árido convencional

En este caso, no se ha considerado conveniente mostrar los resultados obtenidos ya que sólo se han encontrado elementos orgánicos (hojas) en los dos áridos convencionales utilizados procedentes de árboles que cubrían la zona de almacenamiento de los mismos.

Este motivo, ha provocado una selección del material al descartar la capa más superficial de los sacos que los almacenaba lo que ha hecho que el material utilizado haya estado prácticamente limpio de impurezas.

4.2.1.2 Árido reciclado

Para la caracterización del árido reciclado, se ha recurrido a la norma UNE- EN 933-11 [59]. La norma establece un test que consiste en separar las partículas de material reciclado en seis clases diferentes: materiales bituminosos, mampostería, hormigón y materiales cementicios, partículas ligeras, material sin ligantes y otros. Debido a que el material del que se ha dispuesto proviene de procesos de trituración de probetas de un hormigón, sólo se realizó un test de caracterización visual para determinar la cantidad de árido limpio, sin mortero adherido.

A continuación se muestran los resultados medios que se han obtenido. Es importante destacar que se han tomado dos muestras representativas para realizar dicho ensayo.

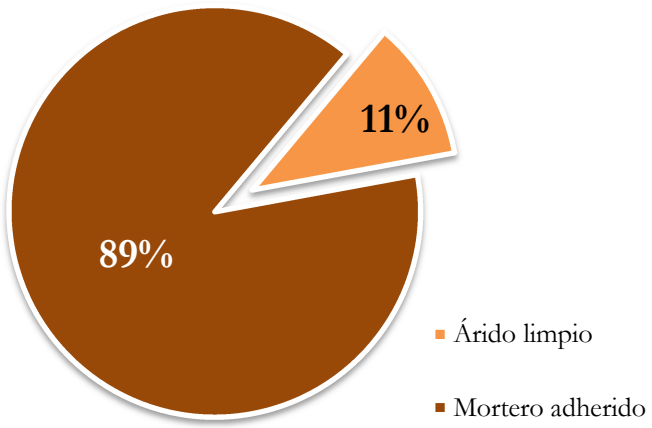


Figura 4.1 Resultado del test visual correspondiente al árido reciclado AR-CJF

Como se observa, la cantidad de árido con mortero adherido es del 89%. Esta elevada cantidad, a priori, afectará negativamente [17] a alguna de las propiedades del hormigón reciclado como consecuencia de la menor densidad y mayor absorción que presenta el mortero adherido contenido en estos áridos con respecto a los de origen natural. Es importante destacar que en el anejo 15 de la EHE-08 [23] (recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados) no se especifica ningún porcentaje máximo contenido en el árido reciclado de mortero adherido.

4.2.2. Granulometría

Para determinar la granulometría de los áridos utilizados, se ha recurrido a las especificaciones de la norma UNE-EN 933-1 [58]. Esencialmente, el ensayo consiste en dividir y separar, mediante una serie de tamices, el material en varias fracciones granulométricas de tamaño decreciente.

4.2.2.1 Grava

Para determinar la granulometría de la grava *G*, se ha recurrido a las especificaciones de la norma UNE-EN 933-1. A continuación, se muestra en la figura 4.2 la curva granulométrica obtenida tras realizar los ensayos de caracterización. Es importante destacar que se han tomado dos muestras representativas para establecer la curva que define la granulometría de dicho material.

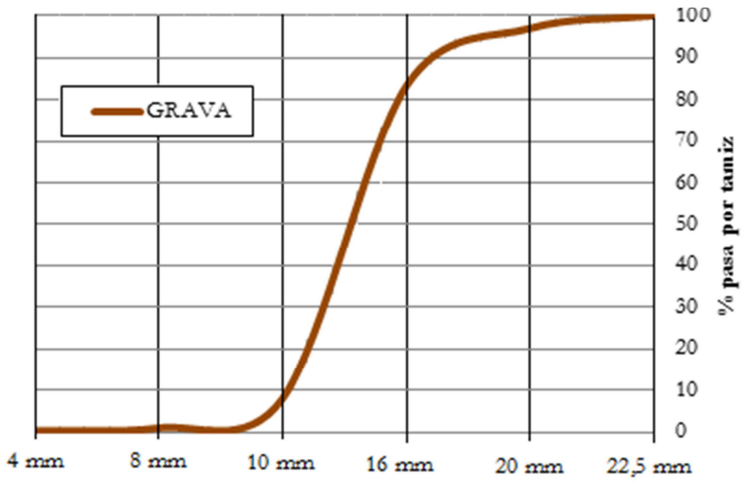


Figura 4.2 Curva granulométrica Grava

Como se puede observar, la forma de la curva indica que el material es bastante homogéneo al tener el mayor número de partículas entre las fracciones 10 y 20 mm. En la tabla 4.1 se muestra lo dicho numéricamente.

Tabla 4.1 Granulometría Grava

	% pasa por tamiz		
Tamiz (mm)	**Muestra 1**	**Muestra 2**	**Media**
22,5	100	100	100
20	99	99	99
16	84	83	83
10	6	6	6
8	1	1	1
4	0	0	0

Para áridos gruesos, la instrucción establece como única condición un contenido máximo de finos (material retenido en el tamiz 0,063 mm) del 1,5%. En este caso, como se comprueba, el árido cumple con lo indicado.

Por todo esto, se puede decir que la grava es adecuada en cuanto a propiedades granulométricas para el desarrollo del estudio ya que cumple con los requisitos establecidos por la normativa.

4.2.2.2 Arena

Para determinar la granulometría de la arena *a*, se ha recurrido a las especificaciones de la norma UNE-EN 933-1. A continuación, se muestra en la figura 4.3 la curva granulométrica obtenida tras realizar los ensayos de caracterización. Es importante destacar que se han tomado dos muestras representativas para establecer la curva que define la granulometría de dicho material.

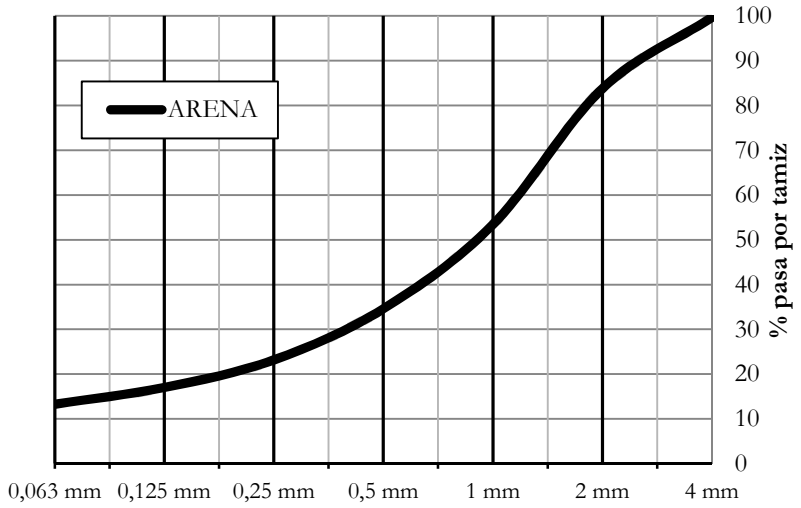


Figura 4.3 Curva granulométrica Arena

Como se puede observar, la forma de la curva indica que el material está bien seleccionado al ser heterogéneo entre las fracciones 0,063 y 4 mm. En la tabla 4.2 se muestra lo dicho numéricamente.

Tabla 4.2 Granulometría Arena

	% pasa por tamiz		
Tamiz (mm)	**Muestra 1**	**Muestra 2**	**Media**
8	100	100	100
4	100	100	100
2	84	83	84
1	55	52	53
0,5	36	34	35
0,25	24	23	23
0,125	17	17	17
0,063	13	13	13

En áridos finos, la instrucción establece un contenido máximo de finos (material retenido en el tamiz 0,063 mm) inferior al 16% para áridos de machaqueo calizos en obras sometidas a una exposición de tipo I. En este caso, como se comprueba, el árido cumple con lo indicado. Además, se cumple que el tamaño máximo (D) es inferior a 4 mm (límite superior indicado en la EHE-08).

Por todo ello, se puede decir que la arena es adecuada en cuanto a propiedades granulométricas para el desarrollo del estudio.

4.2.2.3 Árido reciclado (AR-CJF)

El árido reciclado que se ha utilizado en este estudio procede de la trituración de probetas de hormigón que han sido almacenadas en el laboratorio de la universidad. La trituración se ha llevado a cabo mediante una trituradora de mandíbulas, y se ha determinado la necesidad de dos pasadas por el mecanismo para que la obtención de los tamaños y formas sean las adecuadas.

Para determinar su granulometría, se ha recurrido a las especificaciones de la norma UNE-EN 933-1. A continuación, se muestra en la figura 4.4 la curva granulométrica obtenida tras realizar los ensayos de caracterización. Es importante destacar que se han tomado dos muestras representativas para establecer la curva que define la granulometría de dicho material.

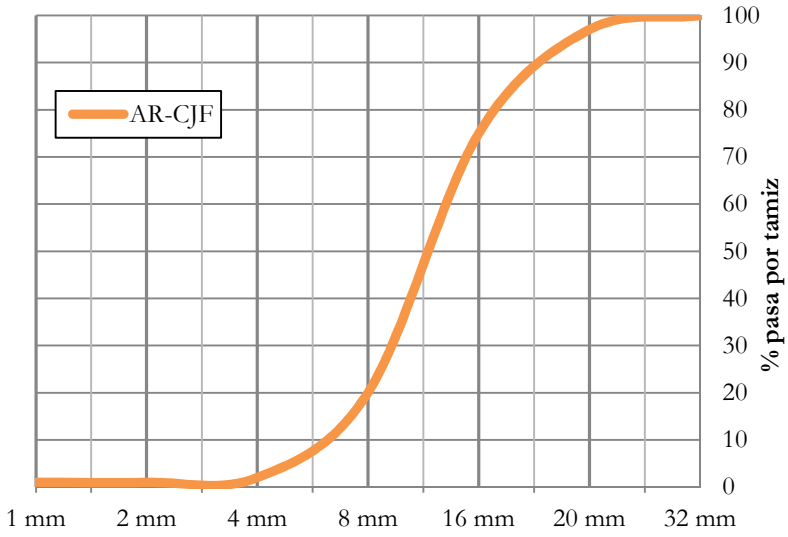


Figura 4.4 Curva granulométrica Árido reciclado (AR-CJF)

Como se puede observar, la forma de la curva indica que el árido reciclado es bastante homogéneo. La mayoría de sus partículas están comprendidas entre las fracciones de 8 y 20 mm. En la tabla 4.3 se muestra lo dicho numéricamente.

Tabla 4.3 Granulometría Árido reciclado (AR-CJF)

	% pasa por tamiz		
Tamiz (mm)	**Muestra 1**	**Muestra 2**	**Media**
22,5	100	100	100
20	99	100	100
16	78	72	75
8	35	30	20
4	21	19	2
2	2	2	1
1	1	1	1

En el caso de áridos reciclados, la EHE-08 cuenta con un anejo donde se hacen una serie de recomendaciones sobre las propiedades que deben cumplir dichos materiales. En cuanto a la granulometría, se le da cierta relevancia al contenido de desclasificados inferiores. Su mayor friabilidad hace que puedan generarse finos durante el proceso de tamizado, almacenamiento y transporte. Por otro lado, si se le añade la presencia de un elevado contenido de mortero adherido, hace que sea muy importante controlar dicho contenido de desclasificados inferiores para no repercutir sobre la calidad del hormigón.

En el anejo 15 se establece un contenido de desclasificados inferior o igual al 10% y un contenido de partículas que pasan por el tamiz de 4 mm no superior al 5%. Como se comprueba, en este caso se cumple con dichas recomendaciones. Por otro lado, la normativa permite un tamaño mínimo de árido reciclado de 4 mm. En este caso, también se cumple.

Por todo esto, se puede decir que el árido reciclado es adecuado en cuanto a propiedades granulométricas para el desarrollo del estudio ya que cumple con los requisitos establecidos por la normativa.

4.2.3. Densidad de partículas y coeficiente de absorción

Para establecer la densidad de partículas de los áridos y su coeficiente de absorción se ha recurrido a la norma UNE-EN 1097-6 [(31)]. La densidad de partículas se calcula a partir de la relación entre la masa y el volumen. La masa se determina pesando la muestra de ensayo en condiciones de saturación, y pesándola de nuevo tras su secado en estufa. El volumen se establece a partir de la masa de agua desplazada, ya sea por la reducción de masa en el método de la balanza hidrostática, o por pesadas según el método del picnómetro.

Como recordatorio, tal y como se detalla en la norma UNE-EN 1097-6, se define *densidad aparente de partículas* ρ_a a la relación entre la masa de una muestra de árido secado en estufa y el volumen que ocupa en agua, con inclusión de los huecos interiores estancos y los huecos accesibles al agua. Por otro lado, se define *densidad de partículas tras secado en estufa* ρ_{rd} a la relación entre la masa de una muestra de árido seco en estufa y el volumen que ocupa en el agua, con inclusión de los huecos interiores estancos y con exclusión de los huecos accesibles al agua. Asimismo, se define *densidad de partículas con saturación y secado de la superficie del árido* ρ_{ssd} a la relación entre la masa combinada de una muestra y la masa de agua contenida en los huecos accesibles al agua y el volumen que ocupa la muestra en agua.

Por otra parte, para definir el coeficiente de absorción, es necesario recordar que la *absorción de agua* es el incremento de la masa de una muestra seca en estufa debido a la penetración de agua en los huecos accesibles.

4.2.3.1. Grava

Los resultados obtenidos tras analizar la granulometría de dicho material (fracciones comprendidas entre 4-31,5 mm) permiten el uso del método del picnómetro para determinar su densidad de partículas. No obstante, en este caso, la norma sugiere el cambio a la balanza hidrostática para una mayor conservación de los picnómetros. De esta manera, se ha recurrido al ensayo de la balanza hidrostática para obtener sus densidades.

A continuación, se muestran en la tabla 4.4 los datos obtenidos de dicho ensayo. Cabe recordar que se han tomado 2 muestras representativas de grava para realizar por duplicado este análisis.

Tabla 4.4 Densidad de partículas y coeficiente de absorción de la Grava

	Muestra 1	**Muestra 2**	**Promedio**
Pesos (gr)			
M1 es la masa de árido saturado y con la superficie seca, pesada al aire, expresada en gramos.	5820,3	5724,1	5772,2
M2 es la masa aparente en el agua de la cesta que contiene la muestra de árido saturado, expresada en gramos.	4806,9	5012,7	4909,8
M3 es la masa aparente en el agua de la cesta vacía, expresada en gramos.	1321,7	1251,1	1286,4
M4 es la masa de la muestra de ensayo secado en estufa, pesado al aire, expresada en gramos.	5536,2	5941,2	5738,7
Densidad de partículas (Mg/m³)			
Densidad aparente ρ_a	2,58	2,84	2,71
Densidad tras secado ρ_{rd}	2,70	2,64	2,67
Densidad con saturación y secado superficie del árido ρ_{ssd}	2,65	2,69	2,67
Coeficiente de absorción (%)			
Absorción de agua	0,52	0,64	0,58

Para áridos gruesos, la EHE-08 establece un coeficiente de absorción inferior al 5% como requisito físico-mecánico para poder ser utilizado en un hormigón. Adicionalmente, se indica que, en hormigones reciclados con un contenido de árido reciclado no superior al 20%, el árido grueso natural debe tener una absorción no superior al 4,5%.

En este caso, se comprueba que la grava cumple con los requisitos establecidos por la normativa en cuanto a propiedades físico-mecánicas.

4.2.3.2. Arena

Tras el análisis granulométrico y siguiendo con las especificaciones de la normativa (uso del método del picnómetro para áridos que pasan el tamiz 31,5 mm y quedan retenidos en el tamiz 0,063 mm) se determina su densidad de partículas y su coeficiente de absorción.

A continuación, se muestran en la tabla 4.5 los datos obtenidos de dicho ensayo. Cabe recordar que se han tomado 2 muestras representativas de arena para realizar por duplicado este análisis.

Tabla 4.5 Densidad de partículas y coeficiente de absorción de la Arena

	Muestra 1	**Muestra 2**	**Promedio**
Pesos (gr)			
M1 es la masa de árido saturado y con la superficie seca, pesada al aire, expresada en gramos.	634,7	728,2	681,5
M2 es la masa del picnómetro que contiene la muestra de árido saturado, expresada en gramos.	3641,7	3700,0	3670,9
M3 es la masa del picnómetro relleno de agua únicamente, expresada en gramos.	3244,0	3246,3	3245,2
M4 es la masa de la muestra de ensayo secada en estufa, pesada al aire, expresada en gramos.	627,5	714,3	670,9
Densidad de partículas (Mg/m³)			
Densidad aparente ρ_a	2,73	2,74	2,74
Densidad tras secado ρ_{rd}	2,65	2,60	2,63
Densidad con saturación y secado superficie del árido ρ_{ssd}	2,68	2,65	2,67
Coeficiente de absorción (%)			
Absorción de agua	1,15	1,95	1,55

Para áridos finos, la EHE-08 establece un coeficiente de absorción inferior al 5% como requisito físico-mecánico para poder ser utilizado en un hormigón.

En este caso, se comprueba que la arena cumple con los requisitos establecidos por la normativa en cuanto a propiedades físico-mecánicas.

4.2.3.3. Árido reciclado *AR-CJF*

Para determinar la densidad y la absorción del árido reciclado se han seguido las mismas directrices ya comentadas en el árido convencional. Cabe destacar que, debido al tamaño de las partículas de árido reciclado, se ha utilizado el método de la balanza hidrostática para realizarlo.

A continuación, se muestran en la tabla 4.6 los datos obtenidos de dicho ensayo. Cabe recordar que se han tomado 2 muestras representativas de árido reciclado para realizar por duplicado este análisis.

Tabla 4.6 Densidad de partículas y coeficiente de absorción del Árido reciclado (AR-CJF)

	Muestra 1	Muestra 2	Promedio
Pesos (gr)			
M1 es la masa de árido saturado y con la superficie seca, pesada al aire, expresada en gramos.	3326,4	3467,7	3397,1
M2 es la masa aparente en el agua de la cesta que contiene la muestra de árido saturado, expresada en gramos.	2809,5	2889,9	2849,7
M3 es la masa aparente en el agua de la cesta vacía, expresada en gramos.	842,1	841,4	841,7
M4 es la masa de la muestra de ensayo secado en estufa, pesado al aire, expresada en gramos.	3137,7	3272,2	3204,9
Densidad de partículas (Mg/m³)			
Densidad aparente ρ_a	2,68	2,67	2,68
Densidad tras secado ρ_{rd}	2,31	2,31	2,31
Densidad con saturación y secado superficie del árido ρ_{ssd}	2,45	2,44	2,45
Coeficiente de absorción (%)			
Absorción de agua	6,01	5,97	5,99

Para áridos reciclados, el anejo número 15 de la EHE-08, establece un coeficiente de absorción no superior al 7% como requisito físico-mecánico para poder ser utilizado en un hormigón reciclado con un contenido de árido reciclado no superior al 20%.

En este caso, se comprueba que dicho material cumple con los requisitos establecidos por la normativa en cuanto a propiedades físico-mecánicas.

4.3 DOSIFICACIÓN

Se entiende como dosificación, o diseño de mezclas de hormigón, al proceso por el cual se obtiene la correcta combinación de elementos que conforman el hormigón con el fin de producir un producto conforme a unas determinadas especificaciones. Uno de los principales objetivos de este proceso es la obtención de un producto que se comportará según algunos requisitos predeterminados, siendo los más importantes, en general, la trabajabilidad del hormigón fresco, la resistencia alcanzada por el hormigón endurecido a una edad determinada y la durabilidad de este hormigón. Asimismo, otro de los propósitos de la dosificación es la producción de una mezcla que cumpla con todos estos requerimientos al menor coste posible.

Para el diseño de los diferentes tipos de hormigones fabricados, se ha empleado el método de Bolomey en todos los casos. En el caso de la fabricación del hormigón convencional y el hormigón reciclado con un 20% de sustitución de árido reciclado por árido grueso natural, se ha aplicado directamente dicho método para ambas relaciones agua/cemento. En el caso de la fabricación del hormigón reciclado con un 20% de sustitución de árido reciclado por árido grueso natural siguiendo las directrices del método EMV, se ha hecho una conversión del procedimiento basado en el ACI adaptándolo al método Bolomey en ambas relaciones agua/cemento.

4.3.1 Hormigón convencional

Para determinar los porcentajes de los áridos necesarios (grava y arena caliza) para la fabricación del hormigón convencional se ha determinado, en primer lugar, el tamaño máximo de árido *D* del que se dispone. A partir de aquí, se ha definido la cantidad de agua necesaria por metro cúbico de hormigón de acuerdo a las tablas propuestas por el método encontradas en la bibliografía [7].

Tras realizar este paso, se ha determinado en qué proporción se deben mezclar las distintas fracciones de árido que van a componer el hormigón a fabricar. El método de Bolomey utiliza una curva de referencia de granulometría variable en función de la consistencia deseada en el hormigón y forma de los áridos. Ésta viene definida por:

$$y = a + (100 - a)\sqrt{\frac{d}{D}}$$

donde *y* es el tanto por ciento en volumen elemental que pasa por cada tamiz de abertura *d*, *D* el tamaño máximo del árido (mm), *d* la abertura de cada uno de los tamices de la serie utilizada (mm) y *a* un parámetro que toma distintos valores en función del tipo de árido y de la consistencia del hormigón.

Una vez establecida la curva de referencia, se ha empleado el método de los tanteos para realizar el ajuste granulométrico de la mezcla de los áridos. Es importante recalcar que se ha considerado que se necesita aportar 1.025 dm^3 de componentes, valor del cual se ha sustraído el volumen de agua hallado, de manera que el resto será el volumen relativo de los áridos que habrá que repartir entre el cemento y las distintas fracciones del árido en la proporción determinada anteriormente.

Finalmente, tras realizar el ajuste y establecer la composición por metro cúbico de hormigón, se establece la dosificación en función del volumen de cada amasada.

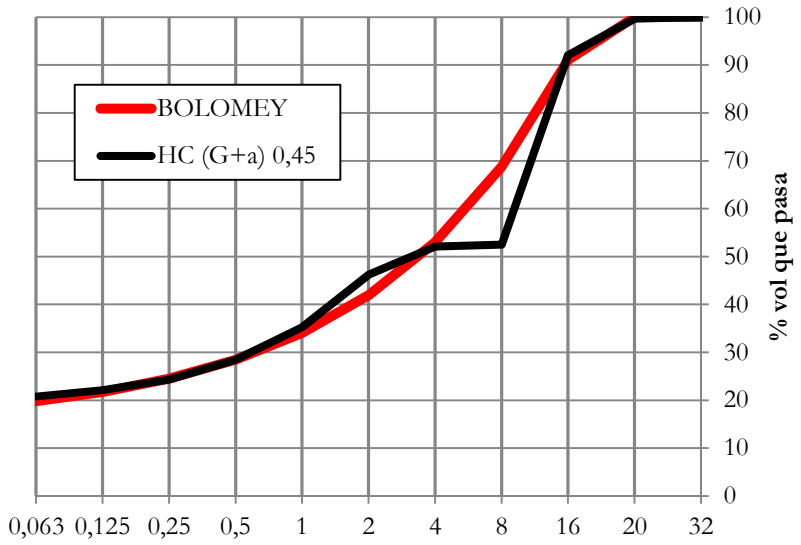
A continuación, se muestra en la tabla 4.7 la dosificación obtenida para la fabricación de 20 litros de hormigón convencional por amasada en las relaciones agua/cemento 0,45 y 0,60 respectivamente.

Tabla 4.7 Dosificación hormigón convencional (20 litros por amasada)

	Agua	**Cemento**	**Grava**	**Arena**
Hormigón convencional 0,45				
Peso componentes (kg)	3,68	8,18	21,70	15,93
Porcentaje en peso (%)	7	16	44	32
Hormigón convencional 0,60				
Peso componentes (kg)	3,68	6,13	20,21	19,17
Porcentaje en peso (%)	7	12	41	39

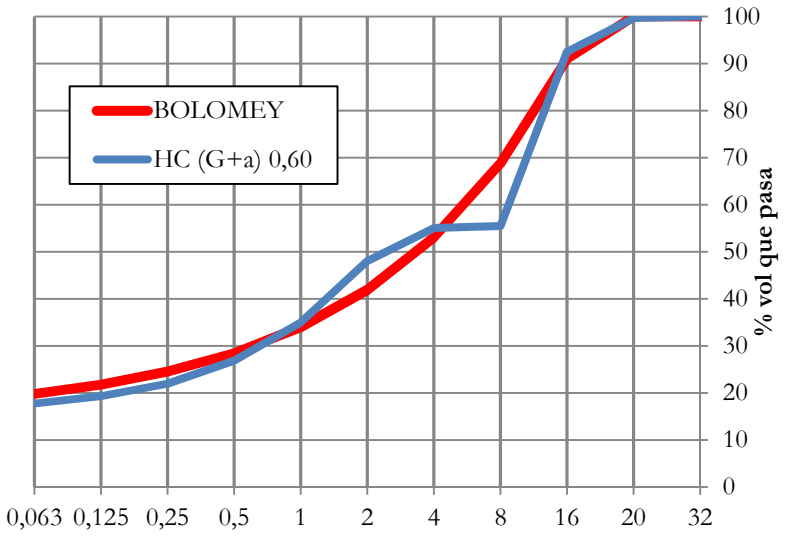
En la figura 4.5 se presenta el ajuste gráfico realizado a la curva de referencia establecida por el método de Bolomey para un parámetro de consistencia a=13 (Blanda) para el hormigón convencional de relación agua/cemento **0,45**.

Figura 4.5 Ajuste granulométrico a la curva Bolomey por el método gráfico de los tanteos para el hormigón convencional con una relación agua/cemento ***0,45***



Por otro lado, en la figura 4.6 se muestra el ajuste gráfico realizado a la curva de referencia establecida por el método de Bolomey para un parámetro de consistencia a=13 (Blanda) para el hormigón convencional de relación agua/cemento **0,60**.

Figura 4.6 Ajuste granulométrico a la curva Bolomey por el método gráfico de los tanteos para el hormigón convencional con una relación agua/cemento ***0,60***



Como se observa en ambos gráficos, debido a la naturaleza de los áridos convencionales que se han utilizado para fabricar el hormigón convencional, existe una zona entre las fracciones 4-16 mm donde el ajuste no ha sido del todo satisfactorio.

4.3.1 Hormigón reciclado

Tal y como se indica en el anejo 15 de la EHE-08, los métodos de dosificación habituales para los hormigones convencionales son válidos para los hormigones reciclados con un porcentaje de sustitución en peso de árido reciclado por árido grueso natural no superior al 20%. Además se recomienda, para conseguir la consistencia deseada, añadir más agua a la dosificación para compensar la mayor absorción del árido reciclado. Otras posibilidades que se sugieren para dicho objetivo es utilizar aditivos plastificantes o superplastificantes en la dosificación o presaturar el árido reciclado.

De esta manera, para el hormigón reciclado con un 20% de sustitución, se ha aplicado directamente el método Bolomey para ambas relaciones agua/cemento. En el caso de la fabricación del hormigón reciclado con un 20% de sustitución de árido reciclado siguiendo las directrices del método E.M.V., se ha hecho una conversión del procedimiento basado en el A.C.I. adaptándolo al método Bolomey en ambas relaciones agua/cemento.

4.3.1.1. Hormigón reciclado con un porcentaje de sustitución del 20% en peso de árido reciclado por árido grueso natural

Tal y como se ha indicado anteriormente, para obtener la dosificación del hormigón reciclado con un porcentaje de sustitución del 20% en peso de árido reciclado por árido grueso natural, se ha utilizado el método Bolomey de igual manera a la ya descrita.

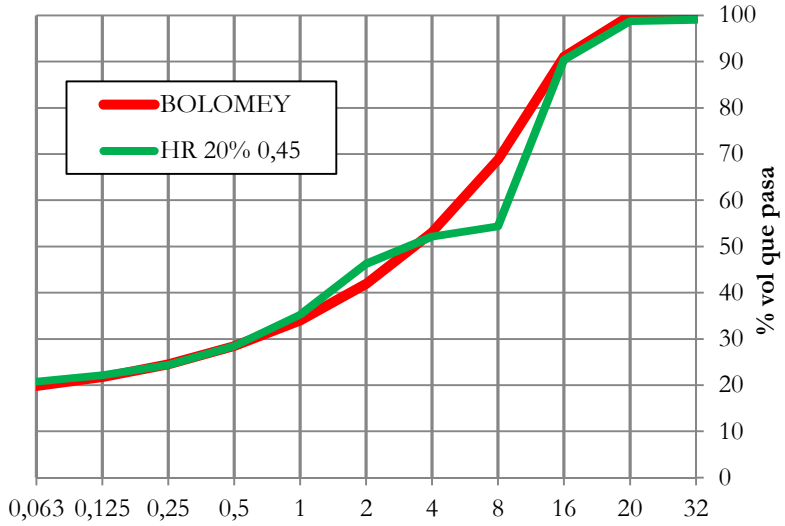
A continuación, se muestra en la tabla 4.8 la dosificación obtenida para la fabricación de 20 litros de hormigón reciclado con un porcentaje de sustitución del 20% en peso del árido natural por amasada en las relaciones agua/cemento 0,45 y 0,60 respectivamente.

Tabla 4.8 Dosificación hormigón reciclado con un 20% de sustitución en peso (20 litros por amasada)

	Agua	**Cemento**	**Grava**	**Arena**	**Árido reciclado**
Hormigón reciclado 20 % 0,45					
Peso componentes (kg)	3,68	8,18	16,83	15,93	4,21
Porcentaje en peso (%)	7	16	35	33	9
Hormigón reciclado 20 % 0,60					
Peso componentes (kg)	3,68	6,13	16,38	18,28	4,09
Porcentaje en peso (%)	7	13	34	37	9

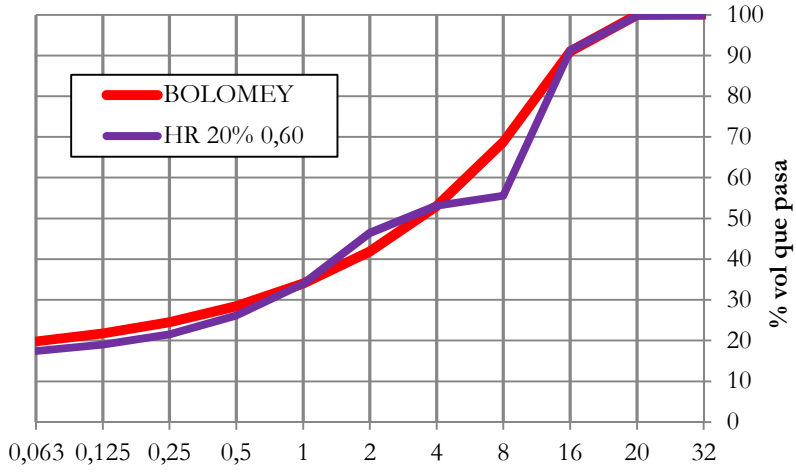
En la figura 4.7, se presenta el ajuste gráfico realizado a la curva de referencia establecida por el método de Bolomey (parámetro de consistencia a=13, blanda) para el hormigón descrito anteriormente para una relación agua/cemento **0,45**.

Figura 4.7 Ajuste granulométrico a la curva Bolomey por el método gráfico de los tanteos para el hormigón reciclado con una relación agua/cemento ***0,45***



Por otro lado, en la figura 4.8, se muestra el ajuste gráfico realizado a la curva de referencia establecida por el método de Bolomey (mismos parámetros de consistencia que con r. a/c 0,45) en el hormigón descrito anteriormente para la relación agua/cemento **0,60**.

Figura 4.8 Ajuste granulométrico a la curva Bolomey por el método gráfico de los tanteos para el hormigón reciclado con una relación agua/cemento ***0,60***



Como se vuelve a observar, para ambas relaciones agua/cemento, debido a la naturaleza de los áridos convencionales que se han utilizado para fabricar el hormigón, existe una zona entre las fracciones 4-16 mm donde el ajuste no ha sido del todo satisfactorio.

4.3.1.2. Hormigón reciclado con un porcentaje de sustitución del 20% de árido reciclado por árido grueso natural (adaptación método E.M.V.)

Para adaptar el método E.M.V. al de Bolomey, se ha partido del desarrollo de una dosificación convencional con éste último para ambas relaciones agua/cemento. Obtenidos los pesos de cada componente del hormigón (como si se tratase de un hormigón ordinario), se ha aplicado la metodología basada en el A.C.I. teniendo en cuenta que:

1. Se ha de obtener la cantidad de mortero adherido al árido natural en el árido reciclado. Con esto se puede realizar un reemplazo de los materiales componentes del mortero. La idea es tomar en cuenta el mortero que ya posee el árido reciclado y restarlo de la mezcla que se ha calculado, intentando lograr con esto una cantidad de mortero y árido natural igual a las de un hormigón convencional.

2. Se ha de obtener el volumen aparente compactado del árido grueso. Esto se logra con los datos del peso del árido grueso y la densidad aparente compactada del mismo, con la finalidad de obtener luego los volúmenes del resto de componentes a agregar. Este paso es necesario para obtener los parámetros usados por la metodología A.C.I..

Hechos los reemplazos comentados anteriormente, se han obtenido finalmente los pesos y volúmenes de los componentes finales para el hormigón a fabricar, cuidando siempre que el reemplazo en peso del árido reciclado llegue al 20%.

A continuación, se muestra en la tabla 4.9 la dosificación obtenida para la fabricación de dicho hormigón reciclado para una amasada de 20 litros en las relaciones agua/cemento 0,45 y 0,60 respectivamente.

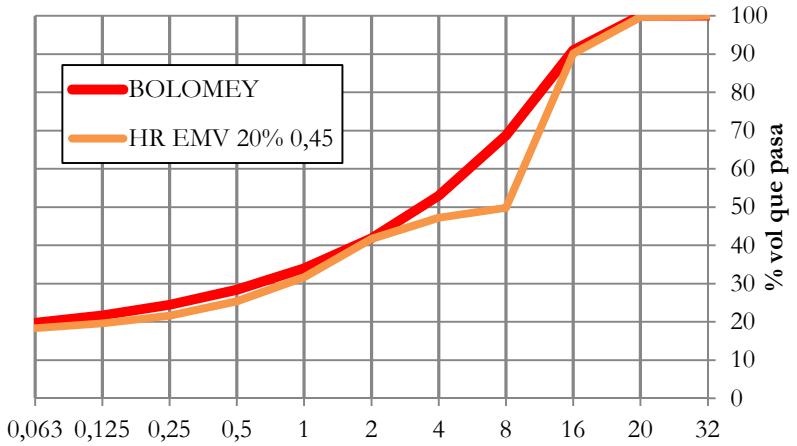
Tabla 4.9 Dosificación hormigón reciclado EMV 20% de sustitución en peso (20 litros por amasada)

	Agua	**Cemento**	**Grava**	**Arena**	**Árido reciclado**
Hormigón r. EMV 20 % 0,45					
Peso componentes (kg)	3,40	7,55	18,81	14,69	4,70
Porcentaje en peso (%)	7	16	38	30	10
Hormigón r. EMV 20 % 0,60					
Peso componentes (kg)	3,40	5,71	17,52	17,85	4,38
Porcentaje en peso (%)	7	12	36	36	9

Prestando atención a los datos mostrados en la tabla, se puede comprobar que gracias al empleo del método E.M.V. se ha conseguido una reducción en peso aproximada del 7% de cemento con respecto al resto de hormigones. Este descenso de uso, es importante ya que contribuye a un ahorro de costes de producción y de emisiones totales de CO_2. Reducción que no debe comprometer las propiedades mecánicas del producto final.

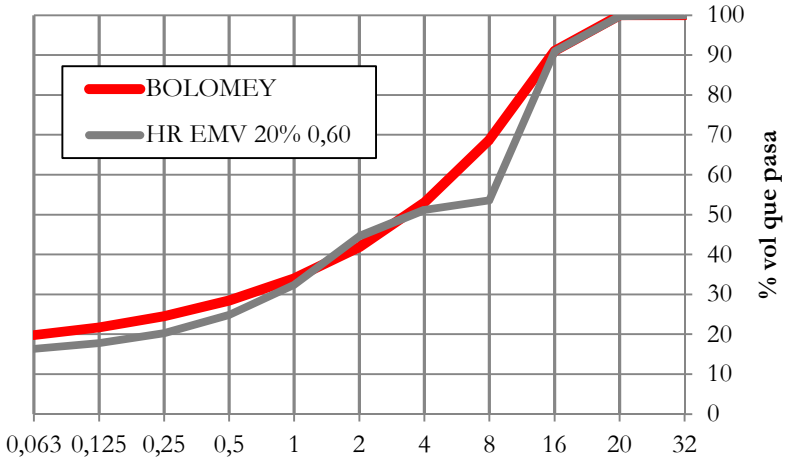
A continuación, en la figura 4.9, se presenta el ajuste gráfico realizado a la curva de referencia establecida por el procedimiento de Bolomey (parámetro de consistencia a=13, blanda) tras realizar la adaptación del método E.M.V. para el hormigón reciclado de relación agua/cemento **0,45**.

Figura 4.9 Ajuste granulométrico a la curva Bolomey por el método gráfico de los tanteos tras adaptar el método EMV para el hormigón reciclado con una relación agua/cemento ***0,45***



Por otro lado, se muestra en la figura 4.10 el ajuste gráfico realizado a la curva de referencia establecida por el procedimiento de Bolomey (parámetro de consistencia a=13, blanda) tras realizar una adaptación del método E.M.V. para el hormigón reciclado de relación agua/cemento **0,60**.

Figura 4.10 Ajuste granulométrico a la curva Bolomey por el método gráfico de los tanteos tras adaptar el método EMV para el hormigón reciclado con una relación agua/cemento ***0,60***



Como se vuelve a observar en ambos tanteos, debido a la naturaleza de los áridos convencionales que se han utilizado para fabricar el hormigón, existe una zona entre las fracciones 4-16 mm donde el ajuste no ha sido del todo satisfactorio.

4.4 HORMIGÓN FRESCO

4.4.1 Consistencia

Para el desarrollo de esta tesis, en algunos de los hormigones que se han fabricado, se ha utilizado el aditivo superplastificante/reductor de agua de alta actividad GLENIUM SKY 604. Éste se caracteriza por, sin modificar el contenido de agua, aumentar considerablemente el asiento y el escurrimiento del hormigón fresco, mejorando así su trabajabilidad.

Cabe destacar que, el reductor de agua de alta actividad, se ha agregado al hormigón durante la última fase del mezclado y con una pequeña parte del agua total de amasado (tal y como se indica en las especificaciones técnicas del producto) dependiendo siempre de la consistencia observada durante dicho proceso. Por esta razón, a veces, ha resultado difícil determinar la cantidad exacta de aditivo a añadir para conseguir la consistencia deseada (blanda-fluida para poder compactarlo de manera óptima con los recursos de los que dispone el laboratorio). No obstante, en todos los casos, se ha intentado seguir la relación de dosificación habitual recomendada por las especificaciones (0,30 – 1,0% sobre el peso de cemento).

Es importante recordar que, según la normativa española EHE-08, en hormigones resistentes, los descensos nunca podrán ser superiores a 15 cm (consistencia líquida), salvo que esta consistencia se obtenga mediante el empleo de aditivos superplastificantes. Dicha circunstancia podría significar la exudación y segregación del hormigón.

4.4.1.1 Discusión de los resultados de consistencia

A continuación, se muestran en la tabla 4.10 los abatimientos del cono de Abrams obtenidos en las mezclas fabricadas en centímetros y las cantidades de aditivo de alta actividad añadidas en cada hormigón, en % respecto al peso total de cemento.

Tabla 4.10 Consistencias y aditivo añadido en los hormigones fabricados

Tipo de hormigón relación a/c	Asiento (cm)	Consistencia	Aditivo (%)
H. convencional			
0,45	15	Fluida	0,27
0,60	13	Fluida	-
H. reciclado 20%			
0,45	14	Fluida	0,17
0,60	8	Blanda	-
H. reciclado EMV 20%			
0,45	15	Fluida	0,37
0,60	6,5	Blanda	-

Como se comprueba, sólo se ha utilizado aditivo en los hormigones con relación agua/cemento 0,45. Dichos hormigones, al contener una menor cantidad de agua, han resultado menos trabajables que los de relación 0,60, haciendo necesario el empleo de una adición para mejorar las condiciones de compactación (adaptándolas a los medios de los que dispone el laboratorio). Es importante destacar que, a pesar de que las especificaciones técnicas del producto recomendaban su uso en un rango de porcentaje del 0,30 al 1,0 % del peso de cemento, en algunos casos y bajo la observación directa del proceso de amasado, no se ha llegado al valor mínimo indicado.

El uso de aditivo en relaciones 0,45 ha provocado que los asientos del hormigón fresco hayan sido superiores en todos los casos a los de relación 0,60. Esto demuestra el gran efecto que tienen dichas adiciones ya que en circunstancias normales (sin uso del mismo) debería haber sido al contrario (mayor cantidad de agua implica una mayor fluidez en la mezcla).

Por otro lado, las consistencias obtenidas en los hormigones de relación 0,60 (sin aditivo) han cumplido con los objetivos marcados durante la fase de dosificación. El método de dosificación utilizado (Bolomey) se basa en el ajuste de la curva granulométrica de los áridos que componen el hormigón a una curva patrón que depende, entre otros parámetros, de la consistencia final a obtener. En este caso, se buscaba una consistencia blanda y es el resultado que se ha obtenido.
En cuanto a las diferencias de consistencia, fijándose sobre todo en la relación 0,60 (sin aditivo), entre los hormigones convencionales y los hormigones con árido reciclado, se puede observar que los valores de los segundos son menores. Esto quizá se deba a un efecto de la forma y rugosidad de las partículas del árido reciclado. Asimismo, se observa que no existen variaciones significativas al comparar los dos tipos de hormigón con árido reciclado fabricados.

Por todo lo comentado anteriormente, se puede decir que los resultados de consistencia que se han obtenido se pueden considerar lógicos y normales. A continuación, se muestran las fotografías tomadas durante el proceso de medida de los asentamientos de los hormigones fabricados a través del ensayo del cono de Abrams.

relación a/c 0,45

relación a/c 0,60 (sin aditivo)

Figura 4.11 Asientos hormigón convencional (HC)

relación a/c 0,45

relación a/c 0,60 (sin aditivo)

Figura 4.12 Asientos hormigón reciclado (20% sustitución en peso del árido natural) (HR 20%)

relación a/c 0,45

relación a/c 0,60 (sin aditivo)

Figura 4.13 Asientos hormigón reciclado método EMV (HR EMV 20%)

4.4.2 Temperatura

Es de sobra conocida la gran influencia de la temperatura ambiente en el comportamiento del hormigón (influye notablemente sobre el proceso de hidratación del cemento) y las precauciones que se deben tomar en situaciones extremas tanto en el proyecto como en su amasado, transporte y puesta en obra y curado.

Ciertos estudios experimentales [66] indican que cuanto menor es el diferencial térmico entre la temperatura del hormigón y la temperatura ambiente, mejores son los resultados en cuanto a prestaciones mecánicas. En este sentido, sabiendo que los áridos y el agua son los elementos que más afectan a la temperatura del hormigón, se ha procurado controlar la temperatura de los áridos almacenándolos en el laboratorio antes de cada amasado.

4.4.2.1 Discusión de los resultados de temperatura

A continuación, se muestra en la figura 4.14 las temperaturas (ºC) tomadas durante el proceso de amasado en todos los hormigones fabricados. Es importante recordar que se ha medido con un termómetro digital la temperatura del laboratorio antes de cada proceso de amasado así como la temperatura del hormigón fresco durante el periodo de reposo (temperatura inicial hormigón) y tras los 2 últimos minutos de amasado (temperatura final del hormigón).

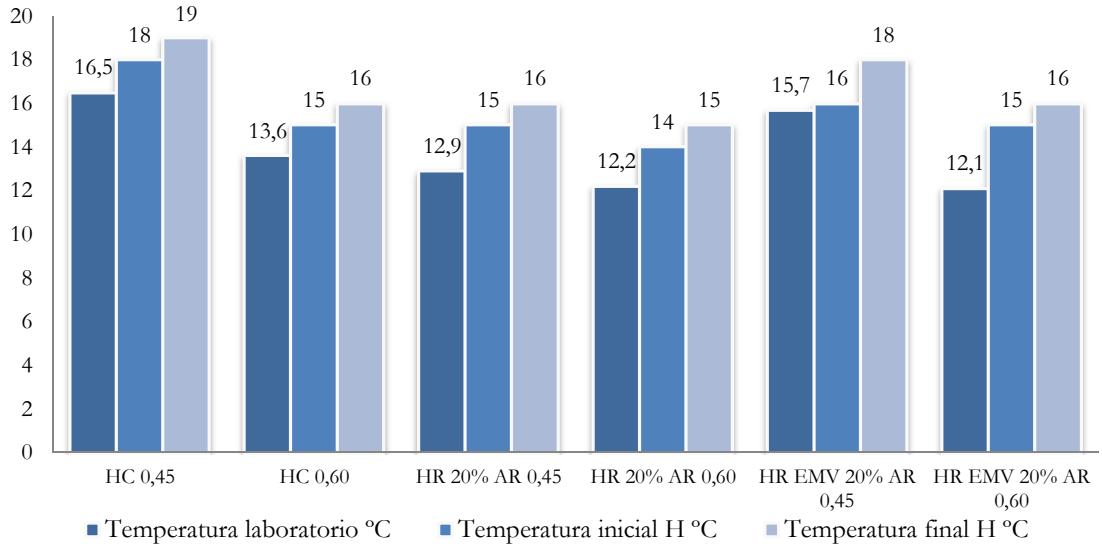


Figura 4.14 Control de temperaturas

Como se puede observar, debido a las reacciones químicas internas que tienen lugar en el hormigón durante el proceso exotérmico de hidratación del cemento, se corrobora que la temperatura del hormigón tiende a ir en aumento [7]. Por otro lado, se comprueba que las variaciones máximas de temperatura en ninguno de los casos han sido superiores a 4 ºC. Esto hace indicar que no vayan a existir problemas en cuanto a defectos de resistencia mecánica de los hormigones fabricados al endurecer. En cuanto a la humedad relativa del laboratorio, se ha medido antes de cada proceso de amasado estando todos los valores comprendidos entre 21-46%.

4.5 HORMIGÓN ENDURECIDO

Es importante recordar que los ensayos sobre el hormigón en estado endurecido se han realizado tras 28 días almacenados en una cámara húmeda en condiciones estacionarias de 20 ºC y 98±2% de humedad.

4.5.1. Densidad

La densidad o masa específica del hormigón endurecido es la cantidad de peso por unidad de volumen. Su valor dependerá, entre otros, de la naturaleza de los áridos, su granulometría, el método de compactación empleado y la relación agua/cemento. Generalmente, será mayor cuanto mayor sea la de los áridos utilizados y mayor cantidad de árido grueso contenga; y mayor cuanto mejor compactado esté.

Debido a que la densidad de los áridos reciclados es menor a la densidad de los áridos convencionales por la presencia de mortero adherido [29], se espera que los hormigones reciclados tengan una menor densidad a la de los convencionales. No obstante, un estudio realizado [38] corrobora que este descenso es prácticamente inapreciable cuando la sustitución del árido grueso es del 20% (caso de los hormigones reciclados de esta tesis).

Es importante recordar que, para determinar la densidad de los hormigones fabricados, se ha recurrido a la norma UNE-83-312-90 [63]. Además, los datos analizados corresponden a los resultados medios, obtenidos en la medida de la densidad en el hormigón endurecido y realizados para cada una de las amasadas.

4.5.1.1 Discusión de los resultados de densidad

A continuación, se muestra en la figura 4.15 los datos de densidad obtenidos (kg/m^3) para los hormigones en estado endurecido con relación agua/cemento **0,45** tras 28 días en la cámara húmeda.

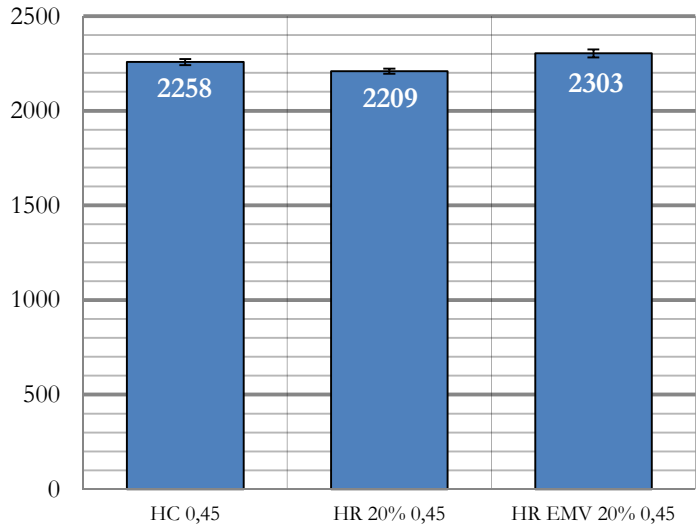


Figura 4.15 Densidad media hormigones con relación a/c 0,45 (kg/m^3)

Tal y como se podía esperar, no se observa un descenso significativo de la densidad entre el hormigón convencional HC y el hormigón reciclado HR 20%. Esta variación del 2,1% se encuentra dentro de los límites establecidos en el anejo 15 de la EHE-08 y por lo tanto puede considerarse dentro de la normalidad.

Por otro lado, se comprueba un aumento de la densidad del 1,9% del hormigón reciclado HR EMV 20% respecto al hormigón convencional HC. Esto, a priori, no parece que entre dentro de la lógica. No obstante, si se tiene en cuenta que uno de los fundamentos principales del método E.M.V. [4] consiste en substituir una parte de la cantidad necesaria de mortero por árido natural (considera que el árido reciclado se compone básicamente de dos partes: los áridos gruesos que conformaban la mezcla original y una cierta cantidad de mortero adherido a éstos), hace pensar que dicho aumento pueda ser debido a este motivo.

Esto último se puede corroborar si se analizan los siguientes datos de áridos empleados en el diseño de las mezclas de los hormigones de relación a/c 0,45 de la tabla 4.11:

Tabla 4.11 Peso de áridos en los diferentes hormigones de relación a/c 0,45

	Grava	Arena	Árido reciclado	TOTAL	Densidad
Hormigón convencional 0,45					kg/m³
Peso componentes (kg)	21,70	15,93	-	37,6	2257,6
Hormigón reciclado 20% 0,45					
Peso componentes (kg)	16,83	15,93	4,20	36,9	2208,9
Hormigón r. EMV 20% 0,45					
Peso componentes (kg)	18,81	14,69	4,70	38,2	2302,8

Se puede comprobar que la suma en peso de los áridos en el hormigón convencional HC 0,45 es de 37,6 kg, mientras que para el hormigón reciclado HR EMV 20% es de 38, 2 kg. Si se compara la fracción más gruesa de estos valores, se tiene que 21,7 kg son de Grava en el caso del hormigón convencional HC y 23,51 kg son de Grava + Árido reciclado en el caso del hormigón reciclado HR EMV 20%.

Este incremento de material en la fracción más gruesa de la mezcla puede explicar el aumento de densidad que sufre el hormigón reciclado HR EMV 20% cumpliendo así con dos de las premisas que más influyen en la densidad del hormigón fabricado: mayor cuanto mayor sea la cantidad de los áridos utilizados y mayor cantidad de árido grueso contenga.

Es importante añadir que los valores de densidad obtenidos en todos los hormigones de relación a/c 0,45 entran dentro de los establecidos en la EHE-08 para hormigones ordinarios ya que se encuentran dentro del rango de 2000-2400 Kg/m^3.

A continuación, se muestra en la figura 4.16 los datos de densidad obtenidos (kg/m^3) para los hormigones en estado endurecido con relación agua/cemento **0,60** tras 28 días en la cámara húmeda.

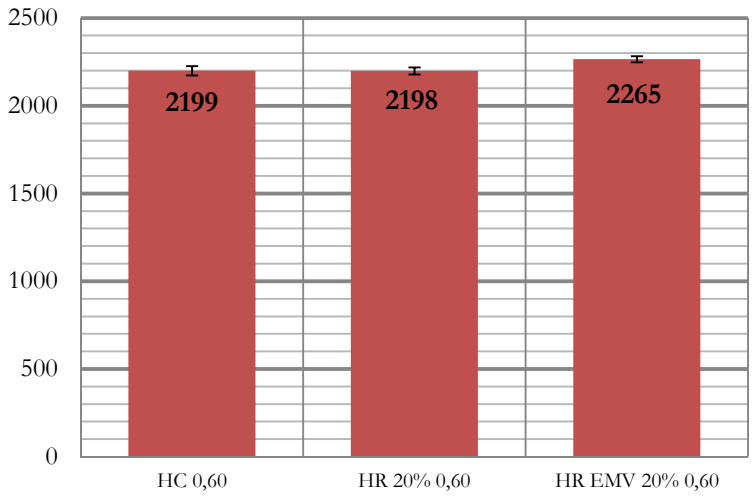


Figura 4.16 Densidad media hormigones con relación a/c 0,60 (kg/m³)

En este caso, se observa una tendencia muy similar a lo ocurrido con los anteriores hormigones de relación a/c 0,45. Por un lado, no se produce descenso de la densidad entre el hormigón convencional HC y el hormigón reciclado HR 20% y por el otro, se produce un aumento de la densidad del 2,9% del hormigón reciclado HR EMV 20% respecto al hormigón convencional HC. Por lo tanto, todo lo explicado anteriormente, es válido para explicar lo que se refleja en la figura anterior.

A continuación, se muestran los datos de áridos empleados en el diseño de las mezclas de los hormigones de relación a/c 0,60 en la tabla 4.12

Tabla 4.12 Peso de áridos en los diferentes hormigones de relación a/c 0,60

	Grava	Arena	Árido reciclado	TOTAL	Densidad
Hormigón convencional 0,60					kg/m³
Peso componentes (kg)	20,21	19,17	-	39,4	2199,48
Hormigón reciclado 20% 0,60					
Peso componentes (kg)	16,38	18,28	4,09	38,7	2198,45
Hormigón r. EMV 20% 0,60					
Peso componentes (kg)	17,52	17,85	4,38	39,8	2265,16

Se puede comprobar que la suma en peso de los áridos en el hormigón convencional HC 0,45 es de 39,4 kg, mientras que para el hormigón reciclado HR EMV 20% es de 39, 8 kg. Si se compara la fracción más gruesa de estos valores, se tiene que 20,2 kg son de Grava en el caso del hormigón convencional HC y 21,9 kg son de Grava + Árido reciclado en el caso del hormigón reciclado HR EMV 20%. Por todo ello, lo explicado anteriormente resulta válido para este caso.

En este caso también, los valores de densidad obtenidos en todos los hormigones de relación a/c 0,60, entran dentro de los establecidos en la EHE-08 para hormigones ordinarios al encontrarse dentro del mismo rango comentado anteriormente.

En cuanto a la comparación de densidades entre los hormigones de relación agua/cemento 0,45 y los de 0,60 se puede observar que éstos últimos tienen una densidad menor en todos los casos. Esto puede deberse a que, en relaciones agua/cemento elevadas, el hormigón que resulta está formado por una estructura más porosa lo que provoca menores densidades al tener mayor volumen de aire.

4.5.2 Resistencia a compresión

Antes de mostrar los resultados obtenidos, es importante recordar que, para el desarrollo del estudio experimental, se utilizaron, por un tema logístico, moldes cilíndricos metálicos de dimensiones 10x20 cm.

Dichas dimensiones no son las que habitualmente se emplean para realizar este tipo de ensayo (la norma contempla probetas de 15x30 cm). No obstante, en el artículo 86.3.2 de la EHE-08 se establece que si se dispone de resultados de ensayos efectuados sobre probetas diferentes a las de 15x30 cm es necesario utilizar coeficientes de conversión para obtener los valores correspondientes a las condiciones tipo. En el mismo figuran valores orientativos, donde se consigna que para "transformar" los resultados de probetas de 10x20 cm a probetas de 15x30 cm debe multiplicarse el resultado de la probeta pequeña por un valor medio de 0,97 (entre 0,94 y 1,00). Por este motivo, todos los valores obtenidos han sido multiplicados por dicho factor corrector. Por otro lado, también es necesario recordar que para realizar el ensayo de compresión, se ha seguido con lo que se especifica en la norma UNE 83-304-84 [(64)].

Hechas las aclaraciones pertinentes, se define resistencia a compresión como el esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga axial de aplastamiento. A priori, bajo la misma relación agua/cemento, se espera que el hormigón reciclado con un porcentaje de sustitución del 20% de árido convencional tenga una menor resistencia respecto al hormigón convencional. Esto se espera debido a la presencia, entre otras cosas, de mortero adherido en los áridos reciclados que sustituyen a una parte de los convencionales siendo un factor que repercute negativamente en las propiedades mecánicas del hormigón resultante. No obstante, existen algunos estudios [(41)] [(42)] que indican que con porcentajes de sustitución de hasta un 20% de árido reciclado apenas se producen diferencias resistentes con los hormigones de control.

Por otro parte, en el hormigón reciclado fabricado con la aplicación del método E.M.V. (HR EMV 20%) se esperan resultados similares o incluso ligeramente superiores a los del hormigón convencional. Esto es debido a que dicho método sustituye una parte de la cantidad de mortero necesaria en la mezcla por árido convencional grueso al considerar que ya existe dicha cantidad adherida al árido reciclado en su fracción más fina.
La idea es intentar llegar a los mismos contenidos de mortero y árido grueso que un hormigón convencional lo que, como mínimo, iguale sus prestaciones mecánicas y sobretodo sea más económico en su fabricación.

En cuanto a las comparaciones entre las resistencias de hormigones con relación a/c 0,45 y 0,60 se espera una mayor resistencia en los primeros. La disminución de la resistencia del hormigón debida al aumento de la relación agua/cemento se explica por la disminución de la compacidad de la pasta de cemento.

4.5.2.1 Discusión de los resultados de resistencia a compresión

Antes de entrar en la discusión de los resultados, es importante destacar que se ha realizado un análisis estadístico como base fundamental de apoyo a las conclusiones que se desprenden de los datos obtenidos de resistencia a compresión. Dicho estudio ha consistido en un análisis de varianza de un solo factor (test de análisis de varianza: ANOVA) para comprobar si existen diferencias significativas de resistencia entre los diferentes hormigones fabricados.

El análisis se ha realizado con el paquete de estadística *SigmaXL* para la aplicación de manejo de hojas de cálculo *Microsoft Excel*. El proceso de análisis que se ha llevado a cabo ha sido el siguiente:

1. Comprobación de homogeneidad de varianzas (Test de Bartlett). Se hace un contraste de hipótesis

   H_0: varianza 1 = varianza 2 = … = varianza k (varianzas iguales)
   H_1: por lo menos una varianza i ≠ varianza j (varianzas diferentes)

2. Se asume como nivel de significación α = ±0,05. Por lo tanto si:

   p-valor < α → Se rechaza H_0 (es decir, las varianzas son diferentes)
   p-valor > α → No se puede rechazar H_0 (es decir, las varianzas son iguales)

3. Test Anova. Se realiza el test y se determina si las medias de los datos obtenidos son iguales.

4. Comprobación de la normalidad de la distribución de los residuos. Para hacerlo, se observa si los puntos siguen la tendencia lineal marcada en el gráfico Q-Q proporcionado.

5. Interpretación de los resultados. Una vez realizados estos pasos, se asegurar que las dos hipótesis se cumplen, y si es el caso, entonces el resultado del test Anova será cierto.

A continuación, se muestra en la figura 4.17 los datos de resistencia obtenidos (MPa) para los hormigones en estado endurecido con relación agua/cemento **0,45** tras 28 días en la cámara húmeda.

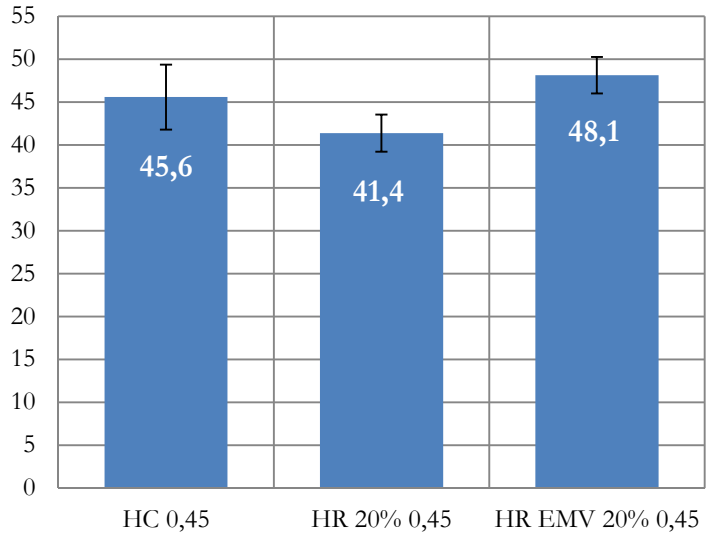


Figura 4.17 Resistencia compresión media hormigones con relación a/c 0,45 (MPa)

Tal y como se podía esperar, se observa un descenso del 9,2% en la resistencia del hormigón reciclado HR 20% respecto al hormigón convencional HC. Esto se debe a que la presencia de mortero adherido en las partículas del árido reciclado sustituido repercute negativamente sobre las propiedades mecánicas del hormigón.

Por otro lado, se ha obtenido una mejora del 5,3% en las propiedades mecánicas del hormigón reciclado con el método E.M.V. (HR EMV 20%) respecto al hormigón convencional. Esta mejora podría explicarse por una mayor dispersión en los datos obtenidos en el hormigón convencional provocando, de esta manera, un descenso en su resistencia media. Este hecho, podría explicarse también si se considera un estudio [43] que demuestra que con hormigones de origen de elevada calidad, con relación de agua/cemento 0,4-0,5 y de elevada resistencia, se pueden conseguir hormigones de mayor resistencia (5-20%) con una disminución de la fluidez en el hormigón fresco.

A pesar de todo lo indicado, será necesario comprobar si dichas variaciones se pueden considerar como significativas a través del análisis estadístico descrito anteriormente.

A continuación se muestra en la tabla 4.13 los datos de resistencia mecánica parcial obtenidos aplicando el factor corrector ya comentado anteriormente.

Tabla 4.13 Resistencia de los hormigones con relación 0,45 tras 28 días en cámara húmeda

	Muestra 1	**Muestra 2**	**Muestra 3**	**Promedio**	**Desviación típica**
Hormigón convencional 0,45					
Resistencia (MPa)	47,6	48,7	41,8	45,6	3,79
Hormigón reciclado 20% 0,45					
Resistencia (MPa)	44,2	40,6	40,5	41,4	2,15
Hormigón r. EMV 20% 0,45					
Resistencia (MPa)	48,2	46,8	50,9	48,1	2,12

Como se comprueba, la desviación típica en el caso del hormigón convencional es mayor, hecho que podría explicar lo comentado anteriormente con respecto a la comparación de resistencias mecánicas entre el HC y el HR EMV 20%.

Tras el análisis teórico de los datos desprendidos de los ensayos a compresión realizados, se muestra el análisis estadístico que se ha llevado a cabo para los hormigones de relación agua/cemento 0,45.

1. Test de homogeneidad de varianzas (Test de Bartlett). En la tabla 4.14 se muestran los resultados de dicho test:

Tabla 4.14 Test de homogeneidad de varianzas para la resistencia a compresión en hormigones de relación agua/cemento 0,45

	Mean	Median	StDev	AD Normality Test p-value	p-value
Hormigón convencional 0,45					
	46,0	47,61	3,71	0,18	
Hormigón reciclado 20% 0,45					
	41,80	40,65	2,11	0,076	
Hormigón r. EMV 20% 0,45					
	48,60	48,17	2,08	0,50	**0,6807**

Como se observa, p-valor > 0,05, por lo tanto no se puede rechazar la hipótesis nula y las varianzas son iguales.

2. Test Anova. En la tabla 4.15, se muestran los resultados de dicho test:

Tabla 4.15 Test Anova para la resistencia a compresión en hormigones de relación agua/cemento 0,45

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de cuadrados	F	p-value
Entre grupos					
	2	70,93	35,46		
Dentro de los grupos					
	6	45,15	7,52		
				4,7127	**0,0588**

El valor-p es mayor que el nivel de significación (valor-p > 0,05), y por tanto, a falta de comprobar la segunda hipótesis, no existen diferencias significativas.

3. Comprobación de la normalidad de la distribución de los residuos, con la figura 4.18 que muestra el gráfico de errores Q-Q:

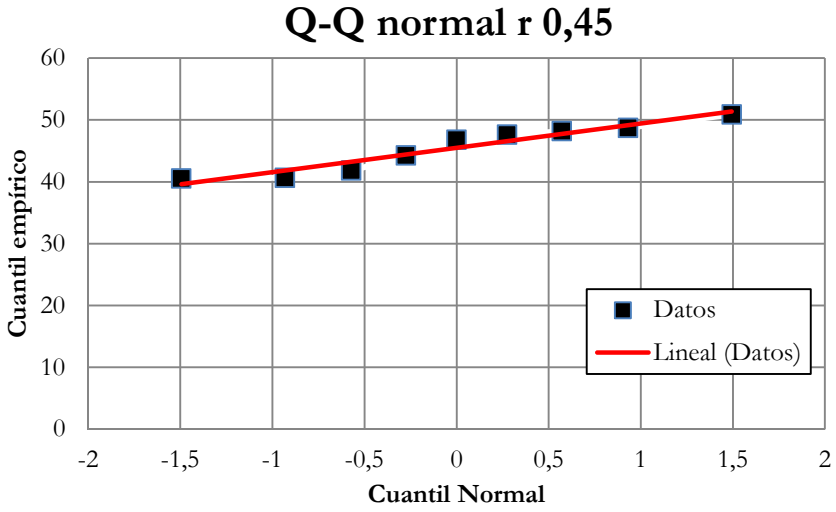


Figura 4.18 Gráfico Q-Q para la resistencia a compresión de los hormigones de relación agua/cemento 0,45

Se puede comprobar, que los puntos siguen una tendencia lineal, por tanto se puede entender que esta última condición también se cumple.

Finalmente se puede concluir que **no existen diferencias significativas** en cuanto a la **resistencia** del hormigón de **relación agua/cemento 0,45** en función del tipo de hormigón fabricado.

En cuanto a la relación agua/cemento **0,60**, a continuación se muestra en la figura 4.19 los datos de resistencia obtenidos (MPa) para los hormigones en estado endurecido tras 28 días en la cámara húmeda.

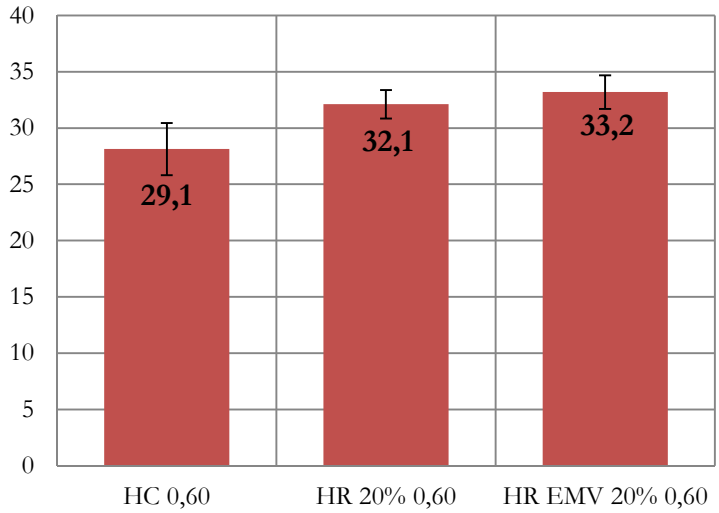


Figura 4.19 Resistencia compresión media hormigones con relación a/c 0,60 (MPa)

A diferencia de lo que se podía predecir, se observa un aumento del 10% y 12% en las resistencias del hormigón reciclado HR 20% y el hormigón reciclado con el método E.M.V con respecto al hormigón convencional HC. Esto que resulta sorprendente, podría ser debido a una mayor dispersión de los datos obtenidos en las diferentes muestras del hormigón convencional HC o a algún defecto durante el proceso de su fabricación (mala compactación, mala hidratación…). A pesar de todo lo indicado, será necesario comprobar si dichas variaciones se pueden considerar como significativas a través del análisis estadístico descrito anteriormente

A continuación se muestra en la tabla 4.16 los datos de resistencia mecánica parcial obtenidos aplicando el factor corrector ya comentado anteriormente:

Tabla 4.16 Resistencia de los hormigones con relación 0,60 tras 28 días en cámara húmeda

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio	Desviación típica
Hormigón convencional 0,60					
Resistencia (MPa)	28,1	30,0	28,1	29,1	3,11
Hormigón reciclado 20% 0,60					
Resistencia (MPa)	34,8	33,6	28,9	32,1	1,26
Hormigón r. EMV 20% 0,60					
Resistencia (MPa)	32,3	34,0	34,3	33,2	1,10

Tras el análisis teórico de los datos desprendidos de los ensayos a compresión realizados, se muestra el análisis estadístico que se ha llevado a cabo para los hormigones de relación agua/cemento 0,45.

1. Test de homogeneidad de varianzas (Test de Bartlett). En la tabla 4.17 se muestran los resultados de dicho test:

Tabla 4.17 Test de homogeneidad de varianzas para la resistencia en hormigones de relación agua/cemento 0,60

	Mean	Median	StDev	AD Normality Test p-value	p-value
Hormigón convencional 0,60					
	29,1	27,7	3,11	0,063	
Hormigón reciclado 20% 0,60					
	32,1	33,6	1,26	0,25	
Hormigón r. EMV 20% 0,60					
	33,2	34,0	1,10	0,15	
					0,3378

Como se observa, p-valor > 0,05, por lo tanto no se puede rechazar la hipótesis nula y las varianzas son iguales.

2. Test Anova. En la tabla 4.18, se muestran los resultados de dicho test:

Tabla 4.18 Test Anova para la resistencia a compresión en hormigones de relación agua/cemento 0,60

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de cuadrados	F	p-value
Entre grupos					
	2	39,13	19,56		
Dentro de los grupos					
	6	23,59	3,93		
				4,9757	**0,05321**

El valor-p es mayor que el nivel de significación (valor-p > 0,05), y por tanto, a falta de comprobar la segunda hipótesis, no existen diferencias significativas entre los datos.

3. Comprobación de la normalidad de la distribución de los residuos, con la figura 4.20 que muestra el gráfico de errores Q-Q.

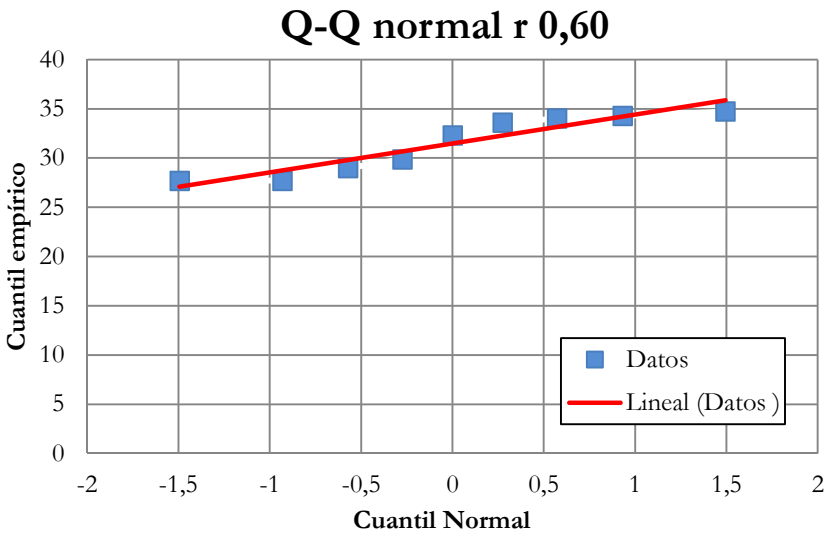


Figura 4.20 Gráfico Q-Q para la resistencia a compresión de los hormigones de r. agua/cemento 0,60

Se puede comprobar, que los puntos siguen una tendencia lineal, por tanto se puede entender que esta última condición también se cumple.

Finalmente se puede concluir que **no existen diferencias significativas** en cuanto a la **resistencia** del hormigón de **relación agua/cemento 0,60** en función del tipo de hormigón fabricado.

4.5.3 Módulo elástico

Se define como módulo de elasticidad a la propiedad general de los cuerpos sólidos, en virtud de la cual recobran más o menos completamente su extensión y forma, tan pronto como cesa la acción de la fuerza que los deforma. El módulo de elasticidad del hormigón representa la rigidez de este material ante una carga impuesta sobre el mismo.

Es importante recordar que para determinar el módulo de elasticidad se han seguido las indicaciones de la norma UNE 83-316-96 [(65)].

Generalmente, cuanto mayor sea el módulo de elasticidad del árido total y mayor sea la proporción en la que se mezclen con los demás componentes más alto será el valor del módulo de elasticidad del hormigón fabricado con ellos.

El módulo de elasticidad de la pasta que forman los áridos reciclados es inferior al módulo de los áridos naturales [49] lo que, a priori, hace esperar que el módulo de elasticidad del hormigón reciclado sea inferior al del hormigón convencional. Existe un estudio [38] que indica que la caída de dicho valor se sitúa en torno al 4-10% cuando el porcentaje de sustitución de árido grueso no sobrepasa el 30%.

4.5.3.1 Discusión de los resultados de módulo elástico

Antes de entrar en la discusión de los resultados, es importante recalcar nuevamente que se ha realizado un análisis estadístico como base fundamental de apoyo a las conclusiones que se desprenden de los datos obtenidos de módulo elástico. Dicho estudio ha seguido las mismas directrices del análisis anterior de resistencias.

A continuación, se muestra en la figura 4.21 los datos de módulo elástico obtenidos (GPa) para los hormigones en estado endurecido con relación agua/cemento **0,45** tras 28 días en la cámara húmeda.

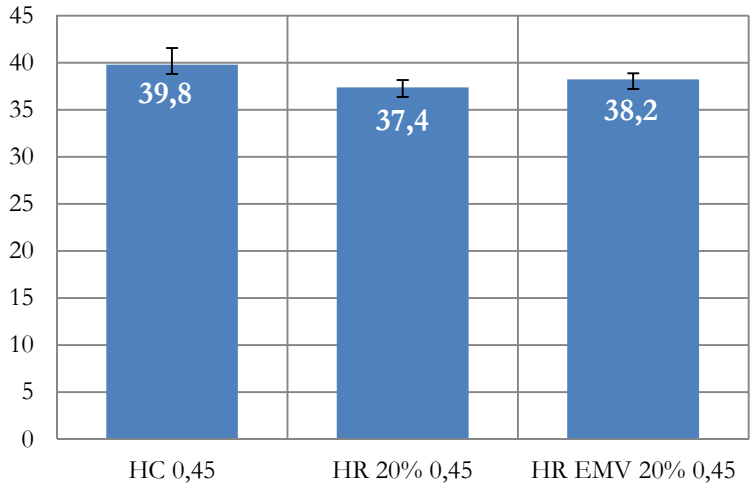


Figura 4.21 Módulo elástico medio hormigones con relación a/c 0,45 (GPa)

Como se podía esperar, se observa una reducción del módulo de elasticidad de los hormigones reciclados respecto al hormigón convencional. Dicha reducción, como indicaban los estudios ya comentados para sustituciones <30% en peso, nunca supera el 10% situándose en un descenso del 6,1%, en el caso del HR 20%, y un descenso del 3,9%, en el caso del HR EMV 20%.

El hecho de que el HR EMV 20% sufra un descenso menor respecto al HR 20% podría ser debido a la mayor presencia de árido grueso en comparación al segundo. Cabe recordar que el método E.M.V. iguala la cantidad de árido grueso que contendría un hormigón convencional al reducir la cantidad de mortero aportado en la dosificación substituyendo una parte de la cantidad necesaria de mortero por árido natural (considera que el árido reciclado se compone básicamente de dos partes: los áridos gruesos que conformaban la mezcla original y una cierta cantidad de mortero adherido a éstos).

No obstante, estas diferencias no parecen ser muy significativas por lo que será necesario realizar un análisis estadístico para comprobarlo.

A continuación, se muestra en la tabla 4.19 los datos de módulo elástico obtenidos para una relación agua/cemento 0,45:

Tabla 4.19 Módulo elástico de los hormigones con relación 0,45 tras 28 días en cámara húmeda

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio	Desviación típica
Hormigón convencional 0,45					
Módulo E (Gpa)	37,7	40,8	40,7	39,8	1,76
Hormigón reciclado 20% 0,45					
Módulo E (Gpa)	36,4	38,1	37,6	37,4	0,81
Hormigón r. EMV 20% 0,45					
Módulo E (Gpa)	37,8	37,8	38,9	38,2	0,65

Tras el análisis teórico de los datos desprendidos de los ensayos de módulo elástico realizados, se muestra el análisis estadístico que se ha llevado a cabo para los hormigones de relación agua/cemento 0,45.

1. Test de homogeneidad de varianzas (Test de Bartlett). En la tabla 4.20 se muestran los resultados de dicho test:

Tabla 4.20 Test de homogeneidad de varianzas para el módulo elástico en hormigones de relación agua/cemento 0,45

	Mean	Median	StDev	AD Normality Test p-value	p-value
Hormigón convencional 0,45					
	39,8	40,7	1,76	0,0751	
Hormigón reciclado 20 % 0,45					
	37,4	35,8	0,81	0,0612	
Hormigón r. EMV 20 % 0,45					
	37,2	37,6	0,65	0,3177	**0,4604**

Como se observa, p-valor > 0,05, por lo tanto no se puede rechazar la hipótesis nula y las varianzas son iguales.

2. Test Anova. En la tabla 4.21 se muestran los resultados de dicho test:

Tabla 4.21 Test de Anova para el módulo elástico en hormigones de relación agua/cemento 0,45

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de cuadrados	F	p-value
Entre grupos					
	2	13154,5	6577,25		
Dentro de los grupos					
	6	18216,4	3036,07		
				2,1664	**0,1957**

El valor-p es mayor que el nivel de significación (valor-p > 0,05), y por tanto, a falta de comprobar la segunda hipótesis, no existen diferencias significativas.

3. Comprobación de la normalidad de la distribución de los residuos, con la figura 4.21 que muestra el gráfico de errores Q-Q.

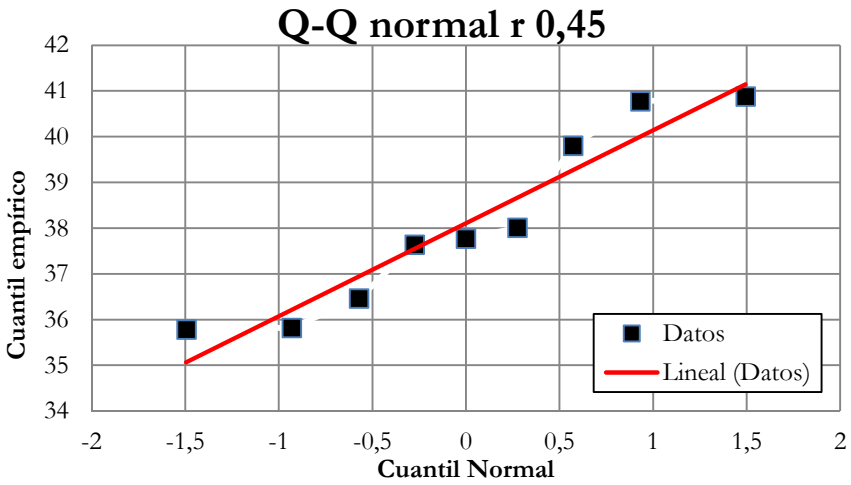


Figura 4.22 Gráfico Q-Q para el módulo elástico de los hormigones de relación agua/cemento 0,45

Se puede comprobar, que los puntos siguen una tendencia lineal, por tanto se puede entender que esta última condición también se cumple.

Finalmente se puede concluir que **no existen diferencias significativas** en cuanto al **módulo elástico** del hormigón de **relación agua/cemento 0,45** en función del tipo de hormigón fabricado.

Por otro lado, en cuanto a la relación agua/cemento **0,60**, a continuación se muestran en la figura 4.23 los datos de módulo elástico obtenidos (GPa) para los hormigones en estado endurecido tras 28 días en la cámara húmeda.

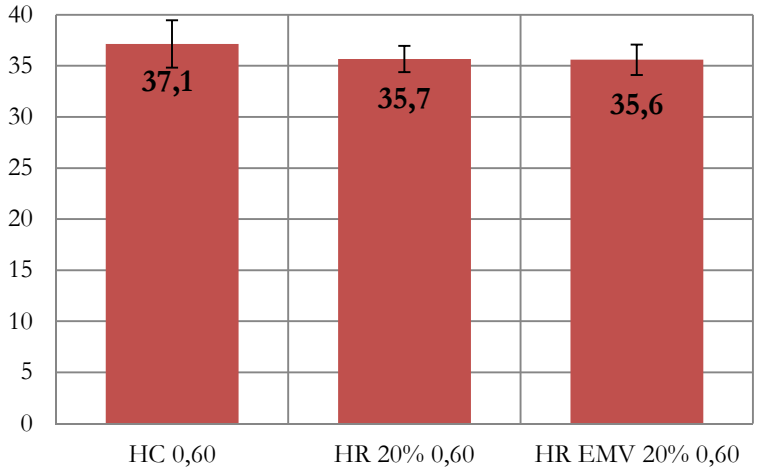


Figura 4.23 Módulo elástico medio hormigones con relación a/c 0,60 (GPa)

Tal y como ha sucedido con la relación agua/cemento 0,45, se observa una reducción del módulo de elasticidad de los hormigones reciclados respecto al hormigón convencional que podría deberse a lo ya comentado anteriormente. En cuanto a las diferencias entre los dos hormigones reciclados no se observan diferencias significativas. No obstante, será necesario realizar un análisis estadístico para comprobar lo dicho.

A continuación se muestra en la tabla 4.22 los datos de módulo elástico parcial obtenidos:

Tabla 4.22 Módulo elástico en los hormigones con relación 0,60 tras 28 días en cámara húmeda

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio	Desviación típica
Hormigón convencional 0,60					
Módulo E (GPa)	39,8	35,8	35,8	37,1	2,31
Hormigón reciclado 20% 0,60					
Módulo E (GPa)	36,6	36,2	34,2	35,7	1,27
Hormigón r. EMV 20% 0,60					
Módulo E (GPa)	34,3	35,1	37,3	35,6	1,49

Tras el análisis teórico de los datos desprendidos de los ensayos realizados a módulo elástico, se muestra el análisis estadístico que se ha llevado a cabo para los hormigones de relación agua/cemento 0,60.

1. Test de homogeneidad de varianzas (Test de Bartlett). En la tabla 4.23 se muestran los resultados de dicho test:

Tabla 4.23 Test de homogeneidad de varianzas para el módulo elástico en hormigones de relación agua/cemento 0,60

	Mean	Median	StDev	AD Normality Test p-value	p-value
Hormigón convencional 0,60					
	37,1	36,2	2,31	0,2028	
Hormigón reciclado 20% 0,60					
	35,7	37,8	1,27	0,0694	
Hormigón r. EMV 20% 0,60					
	35,6	35,1	1,49	0,3637	**0,5945**

Como se observa, p-valor > 0,05, por lo tanto no se puede rechazar la hipótesis nula y las varianzas son iguales.

2. Test Anova. En la tabla 4.24 se muestran los resultados de dicho test:

Tabla 4.24 Test de Anova para el módulo elástico en hormigones de relación agua/cemento 0,60

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de cuadrados	F	p-value
Entre grupos					
	2	13454,49	6727,24		
Dentro de los grupos					
	6	85412,83	1423,54		
				4,7256	**0,0585**

El valor-p es mayor que el nivel de significación (valor-p > 0,05), y por tanto, a falta de comprobar la segunda hipótesis, no existen diferencias significativas entre los datos.

3. Comprobación de la normalidad de la distribución de los residuos, con la figura 4.24 que muestra el gráfico de errores Q-Q:

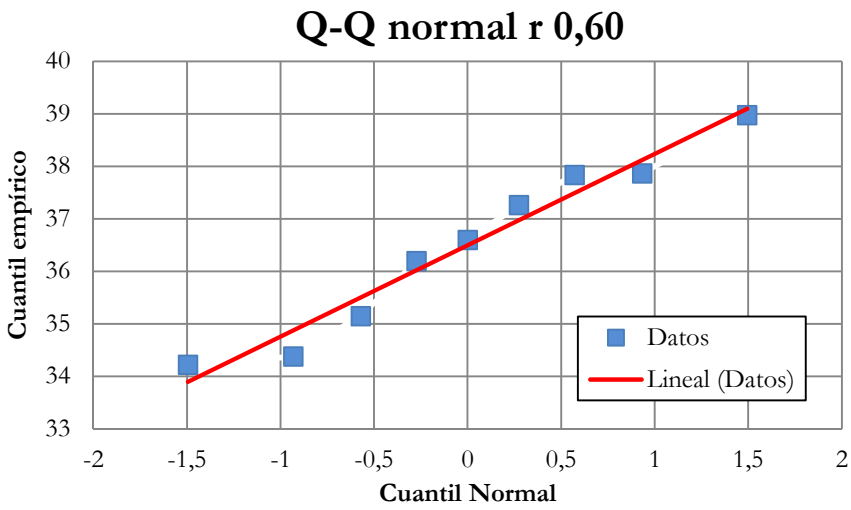


Figura 4.24 Gráfico Q-Q para el módulo elástico de los hormigones de relación agua/cemento 0,60

Se puede comprobar, que los puntos siguen una tendencia lineal, por tanto se puede entender que esta última condición también se cumple.

Finalmente se puede concluir que **no existen diferencias significativas** en cuanto al **módulo elástico** del hormigón de **relación agua/cemento 0,60** en función del tipo de hormigón fabricado.

4.6 RESUMEN DE RESULTADOS

A continuación, se muestra de manera sintetizada en la tabla 4.25 un resumen de los diferentes resultados obtenidos en cada ensayo realizado:

Tabla 4.25 Resumen de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados

		Hormigón convencional	**Hormigón reciclado 20%**	**Hormigón reciclado EMV 20%**
Hormigón fresco				
Consistencia	relación a/c 0,45	Fluida (+aditivo)	Fluida (+aditivo)	Fluida (+aditivo)
	relación a/c 0,60	Fluida/Blanda	Blanda	Blanda
Temperatura	relación a/c 0,45	Normales	Normales	Normales
	relación a/c 0,60	Normales	Normales	Normales
Hormigón endurecido				
Resistencia a compresión	relación a/c 0,45	No se observan diferencias significativas		
	relación a/c 0,60	No se observan diferencias significativas		
Módulo de elasticidad	relación a/c 0,45	No se observan diferencias significativas		
	relación a/c 0,60	No se observan diferencias significativas		

Capítulo 5

Conclusiones

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se exponen, en primer lugar, las conclusiones que se derivan de los distintos estudios realizados a lo largo de este trabajo. Estas conclusiones se presentan en forma de conclusiones generales y de conclusiones específicas.

Las conclusiones generales responden al cumplimiento de los objetivos principales que han guiado el desarrollo de la presente investigación, que en realidad pueden sintetizarse en:

1. Valorar los efectos en las propiedades mecánicas de mezclas con áridos reciclados procedentes de residuos del propio hormigón.

2. Analizar y adaptar el método de dosificación recientemente desarrollado en áridos reciclados (método E.M.V. [5]) al método de Bolomey.

Todo ello, con el objetivo final de la puesta en práctica de una política de actuación dirigida hacia el desarrollo sostenible. Política que contempla el uso de materiales reciclados con un ahorro de costes de producción y de emisiones totales de CO_2 al reducir la cantidad en el uso de cemento en la mezcla gracias a la aplicación del método E.M.V. Reducción que no debe comprometer las propiedades mecánicas del producto final.

Por otra parte, las conclusiones específicas obedecen a distintos aspectos concretos referentes a los estudios que se han realizado encaminados a conseguir los objetivos propuestos. Se han dividido en conclusiones específicas relativas a los resultados obtenidos de los diferentes ensayos.

5.2 CONCLUSIONES GENERALES

1. El **uso** de **áridos** reciclados procedentes de **procesos de trituración del hormigón** es una **excelente solución** de diseño de hormigones. Su **gran calidad**, permite que se comporten satisfactoriamente desde un punto de vista de resistencia mecánica (una de las principales características exigidas en un hormigón). Asimismo, su empleo, presenta grandes atractivos ecológicos al solucionar, al mismo tiempo, los problemas de eliminación de desechos producidos y la elevada utilización de recursos naturales necesarios para fabricarlos. De esta manera, se **reduce el impacto medioambiental** al favorecer la protección de unos recursos que son limitados. Por otra parte, a nivel global provoca un **ahorro de energía** debido a una menor explotación de canteras lo que se traduce en ciertos **beneficios económicos**.

2. El **método E.M.V.** es una **técnica muy atractiva** de **diseño de hormigones reciclados**. Sus fundamentos, combinan las **ventajas** del uso del **reciclado** en hormigones con las de **permitir dosificaciones** con un **menor contenido** de **cemento.** Esto provoca **grandes beneficios** en los **tres pilares** básicos de la **sostenibilidad**.

   Por un lado, a nivel medioambiental:

   - **protege los recursos naturales**: aprovecha todas las ventajas ya comentadas anteriormente.

   - **reduce las emisiones de CO_2**: La industria del cemento genera un 6,6% anual de las emisiones totales a la atmósfera de CO_2. Por otro lado, la huella de carbono de cemento, representa el 78% [(67)] de la huella total que genera un planta integral de producción. Un posible descenso en la producción de cemento, reduciría las emisiones a la atmósfera y se ahorraría energía.

   Por otro lado, a nivel económico:

   - **reducción de los costes de fabricación y del producto final**: El coste aproximado del m^3 de hormigón ordinario (25 MPa) es de 80 € [(67)]. De todos los elementos de este precio, el más importante es la materia prima (75% del coste total). Los componentes que la forman, básicamente se pueden agrupar en: cemento, arena, grava, aditivos/adiciones y agua. De todos ellos, solo el cemento acarrea el 56% del coste total de las materias primas. Por lo tanto, un ahorro de por ejemplo un 7% de este componente (% conseguido en el transcurso de esta tesis con este método) provoca un ahorro aproximado de 2,4 €/m^3 en el precio final. Esta cifra, que no parece muy elevada, si se tiene en cuenta en obras mayormente estructurales, puede suponer un importante ahorro presupuestario.

La combinación de los beneficios medioambientales (ahorro energético, menor contaminación) y económicos conlleva a los bienes sociales como pueden ser:

- **Crear una cultura social**
- **Alternativa de generación de empleo**
- **Genera nuevos recursos para instituciones de beneficio social**

5.3 CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

5.3.1 Hormigón reciclado con un 20% de sustitución en peso de árido reciclado por árido grueso natural

1. La **consistencia** alcanzada en **estado fresco**, para este tipo de hormigón, es **más seca** a la que se ha obtenido en el **hormigón convencional** por lo que la presencia de árido reciclado (en este porcentaje de sustitución) **ha alterado ligeramente su trabajabilidad**.

2. Los valores de **densidad** logrados, se encuentran dentro del **rango** establecido en la EHE-08 para **hormigones ordinarios** y además son **muy similares** a los conseguidos en el **hormigón convencional**.

3. Tras el análisis de los resultados, se puede determinar que **no existen diferencias significativas** en cuanto a **resistencia a compresión** en relación a los hormigones convencionales fabricados.

4. En relación al **módulo de elasticidad**, tras el estudio de los resultados obtenidos, se puede observar que **no hay variaciones significativas** en comparación a los hormigones convencionales fabricados.

Asimismo, en cuanto a resistencia mecánica, se puede concluir que el **uso** de **hormigones reciclados** con este porcentaje de sustitución es **válido** para su aplicación como **hormigón estructural** debido a que se alcanzan **propiedades mecánicas similares** a las de un hormigón convencional. De esta manera, se consiguen hormigones **más sostenibles** al reutilizar materiales de construcción, **reducir el consumo de recursos naturales** y contribuir a una **disminución de la contaminación**; todo ello sin comprometer sus propiedades mecánicas finales y a su trabajabilidad.

5.3.2 Hormigón reciclado con un 20% de sustitución en peso de árido reciclado por árido grueso natural con el método E.M.V.

1. La **consistencia** lograda en **estado fresco**, para este tipo de hormigón, es **levemente más seca** a la que se ha conseguido en el **hormigón convencional** por lo que la presencia de árido reciclado (en este porcentaje de sustitución) y la disminución de la cantidad de cemento en la dosificación **han alterado ligeramente su trabajabilidad**.

2. Los valores de **densidad** alcanzados, se encuentran dentro del **rango** establecido en la EHE-08 para **hormigones ordinarios** siendo **algo superiores** a los conseguidos en el **hormigón convencional** debido a uno de los fundamentos principales del método E.M.V. (sustitución de parte de la cantidad necesaria de mortero por árido grueso natural).

3. A través del estudio de los resultados, se puede comprobar que **no hay diferencias** en cuanto a **resistencia a compresión** en relación a los hormigones convencionales fabricados.

4. Con respecto al **módulo de elasticidad**, tras el análisis de los resultados obtenidos, se puede observar que **no existen variaciones** en comparación a los hormigones convencionales fabricados.

De esta manera, se puede afirmar que el **uso del método E.M.V.** en hormigones reciclados permite conseguir hormigones de **prestaciones mecánicas iguales** a las de los convencionales. De este modo, se obtienen hormigones **muy sostenibles** ya que reúnen las **ventajas** comentadas **del reciclado** junto a las de una **reducción en el consumo de cemento**. Dicha reducción, provoca una **disminución** en la **emisión de gases CO_2, consumo de energía** y del **coste final** del producto generado.

Capítulo 6

Futuras líneas de investigación

1. Estudio comparativo de la **durabilidad** entre los hormigones fabricados con el método E.M.V. y los hormigones convencionales.

2. Desarrollo del método E.M.V. en **otras técnicas de dosificación.**

3. Evaluación comparativa de la **viabilidad económica** entre los hormigones fabricados con el método E.M.V. y los hormigones convencionales.

4. Análisis comparativo del **ciclo de vida** entre los hormigones fabricados con el método E.M.V. y los hormigones convencionales.

5. Extensión del método E.M.V. a hormigones de **alta resistencia**.

6. Ampliación del estudio del método E.M.V. en hormigones con diversos porcentajes de sustitución de árido reciclado para posible **recomendación futura en la EHE**.

Capítulo 7

Bibliografía

1. **Ministerio de Fomento.** *Instrucción de Hormigón Estructural.* s.l. : B.O.E., 2008.

2. *Concrete-Complementary British Standard to BS EN 206-1. Part2: Specification for Constituent Materials and Concrete.* **8500-2:2002, BS.** 2002.

3. *Concrete Aggregate.* **DIN 4226-1:2000 .** 2000.

4. *Specifications for Concrete with Recycled Aggregates.* **RILEM (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures).** 1994, Materials and Structures, Vol. 27.

5. *Apuntes asignatura Materiales de Construcción.* s.l. : ETSECCPB, 2008.

6. **Cagiao Villar, J. y otros.** *Cálculo de la huella ecológica de una industria cementera y propuesta de medidas de ingeniería sostenible destinadas a su reducción.* A Coruña : Universidade da Coruña, 2010.

7. **Fernández Cánovas, M.** *Hormigón.* Madrid : Rugarte, S.L., 1989.

8. *Recycled Concrete as Fine and Coarse Aggregate in Concrete.* **Ravindrarajah, R.S. y Loo, Y.H. y Tam, C.T.** 141, 1987, Magazine of Concrete Research, Vol. 39.

9. *Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading.* **Jianzhuang, X. y Jiabin, L. y Zhang, Ch.** 2004, Cement and Concrete Research, Vol. 35.

10. *Sustainable Development: Differing Perspectives of Ecologist and Econmists, and Relevance to LDCs.* **Tisdell, C.** 3, Londres : s.n., 1988, World Development, Vol. 16, págs. 337-384.

11. *Handbook of Sustainable Building. An Environmental Preference Method for Selection of Materials for Use in Construction and Refurbishment.* **Anink, D., Boonstra, C. y Mak, J.** Londres : s.n., 1996.

12. **Departamento del Banco Mundial de Medio Ambiente.** *Libro de consulta para evaluación Ambiental.* Washington : s.n., 1991.

13. *New Mixture Proportioning Method for Concrete Made with coarse Recycled Concrete Aggregate.* **Fathifazl, G. y otros.** Octubre de 2009, Journal of Materials in Civil Engineering.

14. *New Mixture Proportioning Method for Concrete Made with.* **Fathifazl, G. y otros.** Octubre de 2009, Journal of Materials in Civil Engineering.

15. **American Concrete Institute Committe.** *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91).* 2002.

16. *La eficiencia energética en la producción industrial del hormigón.* **Howland Albear, J.J y Jimenez de la Fe, S.** La Habana, Cuba : Ministerio de la Construcción, Revista Obras.

17. **Arredondo, F.** *Dosificación de hormigones.* Madrid : Instituto Eduardo Torroja, 1977.

18. **American Concrete Institute Committee.** *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91).* 2002.
19. **Hendriks, Ch.** *The Building Cycle.* Netherlans : Aeneas Tech, 2000.
20. **UNE-EN 12620.** *Áridos para hormigón.*
21. *Residuos cerámicos para su posible uso como materia prima en la fabricación de clínker de cemento Portland.* **Puertas, F. y otros.** 281, 2006, Materiales de Construcción, Vol. 56. 0465-2746.
22. *Effect of natural coarse aggregate type on the physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates.* **Zega, C., Villagrá¡n, Y. y Di Maio, A.** 1, 2010, Materials and Structures, Vol. 43, págs. 195-202.
23. *Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete.* **González, B., Martínez, F. y Eiras, J. y Paz, S.** 2011, Materials and Structures.
24. **Asociación Científico Técnica del Hormigón Estructural.** *Técnica del Hormigón Estructural. Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural.* Madrid : s.n., 2006.
25. *Elasticity and Drying Shrinkage of Recycled- Aggregate Concrete.* **Hansen, T. C.y Boeegh, E.** 5, Octubre de 1985, ACI Journal , Vol. 82, págs. 648- 652.
26. **Barra, M.** *Estudio de la Durabilidad del Hormigón de Árido Reciclado en su Aplicación como Hormigón Estructural.* Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. 1996.
27. *Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled agrégate concrete.* **Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A.y Barra, M.** 37, 2007, Cement and Concrete Research, págs. 735-742.
28. **EUROPEAN DEMOLITION ASSOCIATION (EDA).** *Demolition and Construction Debris: Questionnaire about an EC Priority Waste Stream.* s.l. : The Hague, 1992.
29. *Strengths of Concrete Containing Recycled Concrete Aggregate.* **Ikeda, T., Yamane, S. y Sakamoto A.** Japan : s.n., 1988, Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2.
30. *Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural.* **Sánchez, M. y Alaejos, M. P.** Madrid : Centro de Publicaciones Secretaria General Técnica Ministrio de Fomento, 2004.
31. *Materials and mechanical properties. Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume.* **González Fonteboa, B. y Martínez Abella, F.** Abril de 2008, Building and Environment, Vol. 43, págs. 429-437.
32. *Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón armado.* **Barra, M. y Vázquez Ramonich, E.** 1996.
33. **Sánchez, M. y Alaejos, P.** *Cemento y Hormigón. Influencia del árido reciclado en las propiedades del hormigón estructural.* 2006.
34. *Determination of construction and demolition recycled aggregates composition, in considering their heterogeneity.* **Angulo, S. y Mueller, A.** 6, 2009, Materials and Structure, Vol. 42, págs. 739-748.
35. *The portuguese experimental research. Concrete with recycled aggregates.* **De Brito, J. y Alves, F.** 2010, Materials and Structures.
36. **UNE-EN 1097-6.** *Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y absorción de agua.* 2001.
37. **CEDEX.** *Estudio experimental de los áridos finos reciclados.* 2010. Informe para la Dirección General de Calidad Ambiental del MMARM.

38. *Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate.* **Sánchez, M. y Alaejos, M. P.** 2, 2009, Construction and Building Materials, Vol. 23, págs. 872-877.
39. *Effect of natural coarse aggregate type on the physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates.* **Zega, C., Villagrá¡n, Y. y Di Maio, A.** 1, 2010, Materials and Structure, Vol. 43, págs. 195-202.
40. *Additional adsorbed water in recycled concrete.* **Zhang, X. B., Deng, S. C. y Qin, Y. H.** 0, 2007, Journal of Central South University of Technology, Vol. 14, págs. 449-453.
41. **Gómez, J.M.V., Vázquez, E. y Agulló, L.** *Hormigón con áridos reciclados. Una guía de diseño.* s.l. : CIMNE, 2001. 60.
42. *Assessment of the recycling potential of fresh concrete waste using a factorial design of experiments.* **Correia, S. L., Souza, F. L., Dienstmann, G. y Segadães, A. M.** 11, 2009, Waste Management, Vol. 29, págs. 2886-2891.
43. *Estudio sobre la Utilización de Árido Reciclado para la Fabriación de Hormigón Estructural.* **Sánchez de Juan, M.** s.l. : Universidad Politécnica de Madrid, 2005.
44. *Mécanica de estructuras.* **Cervera Ruiz, M.y Blanco Díaz, E.** Barcelona : UPC, 2002, Vol. Libro 1. Resistencia de materiales.
45. *Mechanical properties and durability of concrete from recycled coarse aggregate prepared by crushing concrete. Demolition and reuse of concrete and masonry.* **Nishbayashi, S. y Yamura, K.** Japan : Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium on demolition and reuse of concrete and masonry, 1988. Vol. 2.
46. *Recycled aggregate concrete as strutural material.* **Etxberria, M., María, A. y Vázquez, E.** 5, 2007, Materials and Structures, Vol. 40, págs. 529-541.
47. *Recycled concrete as aggregate for structural concrete production.* **Males¡ev, M., Radonjanin, V. y Snezana, M.** 5, Open Access Journal : Sustainability, MDPI, 2010, Vol. 2.
48. *Recycling and reuse of waste concrete in china: Part I. material behaviour of recycled aggregate concrete.* **Li, X.** 1-2, 2008, Resources, Conservation and Recycling, Vol. 53.
49. *Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural.* **Alaejos, M. P. y otros.** s.l. : Monografías ACHE, 2006.
50. *Elasticity and Drying Shrinkage of Recycled Aggregate* . **Hansen, T. C. y Boeegh, E.** 5, 1985, ACI Journal, Vol. 82.
51. *Recycling of Demolition Concrete and Masonry.* **Hansen, T.C. y otros.** s.l. : T.C. Hansen, 1992. RILEM Report of Technical Committee 37-DCR Demolition and Reuse Concrete. RILEM.
52. **Real Academia Española (R.A.E.).** *Diccionario de la lengua española.* 22ª. Madrid : s.n., 2002.
53. *Long term deformations by creep and shrinkage in recycled aggregate concrete.* **Domingo, A. y otros.** 2009, Materials and Structures.
54. *Recycled aggregates: Production, properties and value-added sustainable applications.* **Limbachiya, M.** s.l. : Materials Science Edition, 2010, Journal of Wuhan University of Technology.
55. *Recycling of Construction and Demolition Waste in Belgium: Actual Situation and Future Evolution.* **Vincke, J. y Rousseau, E.** London : Lauritzen, E.K., 1994, Demolition and Reuse of Concrete and Masonry Proceedings of the Third International RILEM Symposium.
56. **UNE-EN 932-1.** *Ensayos para determinar las propiedades de los áridos.* 1997.

57. **UNE-EN 932-1** *Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.* 2004.
58. **UNE-EN 933-11.** *Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos.* 2009.
59. **Cemex S.A.B. España.** [En línea] 2012. http://www.cemex.es/content/publica/index.asp.
60. **UNE-EN 197-1:2000.** *Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.*
61. **UNE-EN 12390-2.** *Ensayos de hormigón endurecido. Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia.*
62. **UNE-12350-2.** *Ensayos de hormigón fresco. Ensayos de asentamiento.*
63. **UNE-83-312-90.** *Determinación de la densidad en hormigón endurecido.*
64. **UNE 83-304-84.** *Ensayos de Hormigón. Rotura por compresión.*
65. **UNE 83-316-96.** *Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión.*
66. *Estudio experimental sobre la influencia de la temperatura ambiental en la resistencia del hormigón preparado.* **Ortiz Lozano, J.** s.l. : Tesis Doctoral ETSECCPB-UPC, 1989.
67. **Proin S.L.** *Documento técnico sistema de cálculo dosificación hormigón.* 2010.