



universidad
de león

ESCUELA DE INGENIERÍA AGRARIA Y FORESTAL

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA AGRARIA

**DOSIFICACIÓN Y PARÁMETROS MECÁNICOS DE
HORMIGÓN ELABORADOS CON ÁRIDOS RECICLADOS
PROCEDENTES DE PLANTA GESTORA**

***DOSAGE AND MECHANICAL PARAMETERS OF
CONCRETE MADE WITH RECYCLED AGGREGATES
FROM THE MANAGEMENT PLANT***

Alumno: Andrea Crespo Barreiro

Tutor: Andrés Juan Valdés

León, septiembre 2019

ANEXO 9. HOJA DE CONFORMIDAD TRABAJOS DE CARÁCTER CIENTÍFICO O TÉCNICO

Título:

Autor:

ELEMENTOS DE OBLIGADA APARICIÓN

- Resumen.** De 400 palabras como máximo.
- Introducción.** Debe incluir los motivos por los que se realiza el trabajo y los antecedentes o estudios previos sobre el mismo.
- Objetivos.** Se detallarán de forma clara y concisa los objetivos que se pretenden alcanzar.
- Material y Métodos / Metodología.** Descripción de las técnicas, los materiales empleados, y los métodos de análisis de datos, de forma que se garantice la repetibilidad de los mismos.
- Resultados / Análisis / Diagnóstico.** La información obtenida con el estudio se presentará de forma sistemática, preferentemente mediante tablas y figuras que deberán ser en todo caso autoexplicativas, y deberán aparecer debidamente numeradas y referenciadas en un índice propio.
- Discusión.** Los resultados propios del trabajo deberán ser discutidos relacionándolos, en su caso, con otros de estudios precedentes.
- Conclusiones.** Deberán ser claras, concisas, y coherentes con los objetivos propuestos. En el caso planes de ordenación de recursos forestales, propuestas concretas con objetivos, líneas y medidas.
- Planos / Mapas.** Serán obligatorios en trabajos topográficos, estudios de implantación de cultivos o transformaciones de explotaciones, y en general, cualquier trabajo técnico o científico asociado a áreas, parcelas, o territorios determinados.
- Bibliografía.** Listado de las fuentes de información utilizadas debidamente referenciadas y ordenadas.

<p>OBTENIDA LA CONFORMIDAD <input type="checkbox"/></p> <p>DENEGADA LA CONFORMIDAD (No se autoriza la presentación) <input type="checkbox"/></p>	<p>El tutor/es:</p> <p>Fdo.: <input type="text"/> Fdo.: <input type="text"/></p>
--	---

RESUMEN

En este estudio se pretende determinar la viabilidad de realizar un hormigón con una sustitución del 100 % del árido grueso convencional por árido reciclado procedente de hormigón y compararlo con un hormigón convencional elaborado por los mismos métodos de dosificación y prácticamente mismos parámetros, teniendo en cuenta las diferencias en cuanto a comportamiento de ambos tipos de áridos. Además se pretende determinar la influencia de un aditivo superplastificante en otras amasadas de hormigón reciclado, comparándolas con un hormigón elaborado de igual forma pero sin la aplicación de dicho aditivo. Para finalizar, se busca llevar a cabo un hormigón no estructural, en este caso un hormigón de limpieza, con los mismos materiales y dosificación que en el anterior caso para determinar otro posible uso directo y más extendido del árido reciclado.

Para poder realizar estas comparaciones, previa búsqueda bibliográfica, se han elaborado dos ensayos: por una parte uno elaborado en el hormigón fresco como es la medida de la consistencia, determinada en este caso con el cono de Abrams y un ensayo en el hormigón endurecido de rotura a compresión para determinar la calidad final del hormigón y, por lo tanto, del árido reciclado en el caso de las amasadas de hormigón reciclado, empleando los métodos de dosificación de Fuller, Bolomey, La Peña y Faury.

Como principales resultados del presente estudio se obtiene que el hormigón reciclado ha conseguido buenos resultados de resistencia, demostrando así su calidad, pero con consistencias más bien secas debido principalmente a la absorción que presentan los áridos reciclados a consecuencia del mortero adherido en su estructura. En el caso del hormigón reciclado elaborado con superplastificante se ha demostrado cómo con relaciones agua/cemento inferiores consigue mejores valores de consistencia debido al aumento de agua efectiva, pero los resultados de las resistencias han sido malos determinando que se deberían de llevar a cabo más pruebas para poder verificar si el aditivo seleccionado no funciona de forma correcta. Finalmente para el hormigón estructural no se ha obtenido un buen resultado de consistencia a pesar de aumentar la relación agua/cemento y aunque la normativa no exige una resistencia mínima para este tipo de hormigones, el ensayo se llevó a cabo obteniendo malos resultados.

Palabras clave: Residuos de Construcción y Demolición (RCD), áridos reciclados, métodos de dosificación de Faury, Fuller, Bolomey y La Peña

ÍNDICE

1.- INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.- EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN	1
1.1.1.- Evolución del sector de la construcción en España.....	1
1.2.- LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN	4
1.3.- TRATAMIENTO DE LOS RCD	8
1.4.- EL SECTOR DE LOS ÁRIDOS EN ESPAÑA	11
1.4.1.- Los áridos reciclados.....	11
1.5.- HORMIGÓN COMO SOLUCIÓN ECO-SOSTENIBLE	12
1.6.- MARCO NORMATIVO.....	13
2.- OBJETIVOS.....	15
3.- TRABAJO EXPERIMENTAL	16
3.1.- MATERIAL	16
3.1.1.- Cemento	16
3.1.2.- Agua.....	19
3.1.3.- Árido natural	19
3.1.4.- Árido reciclado.....	22
3.1.5.- Aditivo superplastificante	25
3.2.- FUNDAMENTOS DE DOSIFICACIÓN	26
3.2.1.- Relación agua/cemento y absorción de agua.....	26
3.2.2.- Densidad.....	28
3.3.- MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN	29
3.3.1.- Aspectos previos	29
3.3.2.- Método de Fuller	31
3.3.3.- Método de Bolomey	34
3.3.4.- Método de La Peña.....	37
3.3.5.- Método de Faury	39
3.4.- ENSAYO SOBRE HORMIGÓN FRESCO: CONSISTENCIA.....	45
3.5.- ENSAYO SOBRE HORMIGÓN ENDURECIDO: COMPRESIÓN	46
3.5.1.- Fabricación del hormigón.....	46
3.5.2.- Ensayo de rotura a compresión	48
4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	52
4.1.- RESULTADOS HORMIGÓN NATURAL VS RECICLADO	52
4.2.- RESULTADOS DE LA INFLUENCIA DEL ADITIVO EN HORMIGÓN RECICLADO (MÉTODO DE FAURY).....	68
4.3.- RESULTADOS HORMIGÓN NO ESTRUCTURAL.....	77
5.- CONCLUSIONES.....	84
6.- BIBLIOGRAFÍA.....	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Consumo aparente de cemento en miles de toneladas en España	2
Figura 2: Miles de personas ocupadas en el sector de la construcción.....	3
Figura 3: Permisos constructivos de 2009 a 2017	3
Figura 4: Composición de los RCD.....	6
Figura 5: Plantas según nivel tecnológico	9
Figura 6: Diagrama de flujo de planta básica de reciclado de RCD.....	10
Figura 7: Módulo granulométrico del árido natural	21
Figura 8: Módulo granulométrico del árido natural (2/10 mm)	21
Figura 9: Árido reciclado procedente de hormigón suministrado por Reutiliza S.L.	22
Figura 10: Planta suministradora del árido reciclado Reutiliza S.L.	23
Figura 11: Módulo granulométrico del árido reciclado.....	24
Figura 12: Esquema de volumen de agua disponible en mezcla con árido convencional	26
Figura 13: Esquema de volumen de agua disponible en mezcla con árido reciclado.....	27
Figura 14: Comparación del coeficiente de absorción de los áridos gruesos ensayados.....	28
Figura 15: Comparación de las densidades aparentes de los distintos áridos.....	29
Figura 16: Porcentajes y curva patrón según el método de Fuller.....	33
Figura 17: Curva de referencia de Faury	43
Figura 18: Ejemplo de medición de consistencia con el cono de Abrams	46
Figura 19: Hormigonera de eje vertical (izq) y vibrador de aguja (dcha)	48
Figura 20: Probetas de 100x200 mm.....	48
Figura 21: Equipo empleado para ensayo de rotura a compresión.....	49
Figura 22: Probeta antes y después del ensayo de rotura a compresión	50
Figura 23: Curva granulométrica de Fuller para hormigón reciclado y natural	53
Figura 24: Curva granulométrica Bolomey reciclado	55
Figura 25: Curva granulométrica Bolomey natural	56
Figura 26: Curva granulométrica de La Peña reciclado	57
Figura 27: Curva granulométrica de La Peña natural.....	59
Figura 28: Hormigón natural (izq) y reciclado (dcha) método de Fuller.....	60
Figura 29: Hormigón natural (izq) y reciclado (dcha) método de Bolomey	62
Figura 30: Hormigón natural (izq) y reciclado (dcha) método de La Peña	63
Figura 31: Comparativa del asiento para Fuller, Bolomey y La Peña.....	63
Figura 32: Comparativa del contenido en agua y cemento para Fuller, Bolomey y La Peña...	64
Figura 33: Comparativa f_{ck} entre natural y reciclado para Fuller, Bolomey y La Peña	67
Figura 34: Curva granulométrica suavizada método de Faury	69
Figura 35: Curva granulométrica sin suavizar método de Faury.....	70
Figura 36: Curva granulométrica modificada método de Faury.....	71
Figura 37: Cono de Abrams y probetas método de Faury 1	72
Figura 38: Amasada Faury 2	73
Figura 39: Cono de Abrams y probetas Faury 2.....	74
Figura 40: Cono de Abrams y probetas Faury 3.....	75
Figura 41: Comparativa resistencias características métodos de Faury	77
Figura 42: Cono de Abrams y probetas hormigón de limpieza	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparación de la generación de residuos totales con RCD en 2017	5
Tabla 2: Listado europeo de Residuos de Construcción y Demolición	6
Tabla 3: Consumo de árido para la construcción en millones de toneladas en 2017.....	11
Tabla 4: Clasificación de los áridos reciclados en base a su composición	12
Tabla 5: Características y criterios de empleo de los cementos de horno alto	18
Tabla 6: Características del árido natural con fracción granulométrica 6/25 mm	20
Tabla 7: Características del árido natural con fracción granulométrica 2/10 mm	21
Tabla 8: Propiedades del superplastificante MasterEase 5025	25
Tabla 9: Máxima relación agua/cemento y mínimo contenido de cemento	30
Tabla 10: Cantidad de agua en función del tamaño máximo de árido y el tipo.....	31
Tabla 11: Asiento del cono de Abrams correspondiente a distintas consistencias	32
Tabla 12: Modificaciones de las condiciones de la tabla 10	32
Tabla 13: Valores de a en función del tipo de árido y la consistencia del hormigón	34
Tabla 14: Determinación del agua de amasado	35
Tabla 15: Valores de K dependiendo de la clase de cemento y el tipo de árido.....	37
Tabla 16: Volumen de poros en el hormigón según diámetro máximo. Método A.C.I.....	41
Tabla 17: Valores de K y K'	42
Tabla 18: Valores de A y B para método de Faury	44
Tabla 19: Dosificación hormigón natural y reciclado por Fuller.....	53
Tabla 20: Datos de referencia para el método de Fuller	53
Tabla 21: Dosificación hormigón reciclado por Bolomey	54
Tabla 22: Datos referencia Bolomey reciclado	54
Tabla 23: Porcentaje que pasa y proporción de arena, gravilla y grava por Bolomey	55
Tabla 24: Ajuste por módulos granulométricos (Bolomey)	55
Tabla 25: Dosificación Bolomey natural	56
Tabla 26: Porcentaje que pasa y proporción de arena, grava y gravilla por La Peña	56
Tabla 27: Ajustes por módulos granulométricos (La Peña reciclado).....	57
Tabla 28: Correcciones y dosificación final de La Peña natural	57
Tabla 29: Porcentaje que pasa y proporción de arena, gravilla y grava por La Peña	58
Tabla 30: Ajuste por módulos granulométricos (La Peña natural).....	58
Tabla 31: Correcciones y dosificación final de La Peña natural	58
Tabla 32: Agua, cemento y consistencias de Fuller, Bolomey y La Peña	60
Tabla 33: Resultados ensayo de rotura a compresión.....	64
Tabla 34: Resistencias medias, características y uniformidad para Fuller, Bolomey y de La Peña	65
Tabla 35: Dosificación Faury curva suavizada.....	69
Tabla 36: Dosificación Faury modificada sin aditivo.....	71
Tabla 37: Comparación de distintos parámetros entre los tres métodos de Faury	71
Tabla 38: Resultados ensayo de rotura a compresión.....	76
Tabla 39: Resistencias medias, características y uniformidad para el método de Faury	76
Tabla 40: Dosificación hormigón no estructural	78
Tabla 41: Resistencias hormigón de limpieza	80
Tabla 42: Resistencia media, característica y uniformidad del hormigón de limpieza	80

1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- El sector de la construcción

La construcción es uno de los sectores industriales que mueve más dinero a nivel mundial ya que, en la mayoría de economías avanzadas, representa entre el 7 y el 12 % del PIB (Cuadrado Roura et al., 2010). Este mismo, presenta una gestión intensa donde se ve relacionado con diferentes ámbitos productivos y genera una alta conexión con distintas actividades, viéndose involucradas muchas industrias y servicios que hacen difícil su análisis. En España, la industria de la construcción se convirtió en uno de los sectores impulsores de la economía que incluso ha alcanzado una participación significativa en el PIB y en el empleo y que, a pesar de las distintas fluctuaciones que sufre a lo largo de los años y en términos generales, ha estado por encima de las registradas en otros países de Europa occidental, por lo tanto, seguirá siendo un sector básico.

La industria de la construcción siempre mantiene un comportamiento cíclico en las economías de mercado de cualquier país, pero centrándonos en el ámbito español, se produjo una gran expansión del sector que dio lugar posteriormente a un estancamiento, concluyendo con el desplome de la actividad.

1.1.1.- Evolución del sector de la construcción en España

En el periodo de tiempo que transcurrió entre 1985 y 1991 se produjo un fuerte crecimiento del sector de la construcción que se vio muy influenciado por la gran actividad inversora de infraestructuras y también por la construcción residencial, posteriormente, entre 1991 y 1994 ocurrió una retracción de la economía española por diversos factores externos, siendo el sector de la construcción uno de los más afectado en dicho momento. El periodo donde se produjo la gran expansión del sector ocurrió entre 1998 hasta aproximadamente 2007, el cual se considera el periodo dorado de la construcción ya que hubo un gran dinamismo del sector convirtiéndose en la locomotora de la actividad productiva en España, con un crecimiento medio anual de cerca del 6 %. En general, todas estas fluctuaciones de la actividad constructiva se pueden ver reflejadas en el consumo aparente de cemento, que nos sirve de indicativo para conocer cómo se produjeron estas variaciones. Como se puede ver en la figura 1 y como se ha citado anteriormente, existe un crecimiento inicial del consumo aparente

obteniendo el valor más bajo en 1992 (periodo donde se produjo la primera crisis del sector), seguido de un crecimiento exponencial donde se ve el valor más alto de consumo en 2007 (periodo dorado de la construcción) y que continua con un gran descenso en los años posteriores.

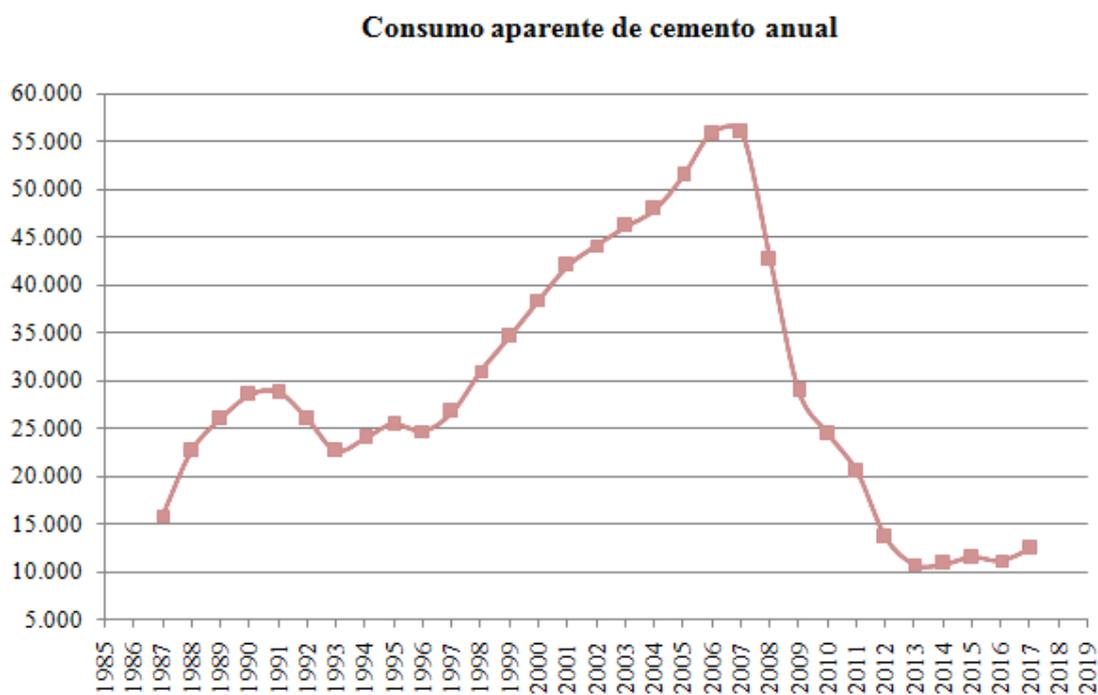


Figura 1: Consumo aparente de cemento en miles de toneladas en España

Fuente: Elaboración propia a partir de datos extraídos del Ministerio de Fomento

Hacia 2008 tras haber vivido una época donde se produjo un incremento elevado de la edificación en España, la construcción sufre un fuerte declive, lo que supuso tanto un parón como una gran pérdida de parte de los sectores de la edificación que, además, se vio agravada por la gran expansión que hubo en años anteriores. Todo esto se ha visto reflejado en la pérdida de inversores en la obra pública, en la pérdida de empresas constructoras y autónomos de la construcción, en el descenso del consumo aparente de cemento como podemos observar en la figura 1 y sobre todo en la pérdida de personas empleadas en la construcción. La menor actividad del sector presentada en este periodo, que además es altamente intensivo en mano de obra, y que absorbía hasta 2007 una proporción de empleo mayor frente a otras economías europeas, contribuyó de manera significativa a la destrucción de empleo sufrida en España durante los años de crisis. Como se puede ver en la figura 2 a partir de 2007 donde se obtuvo una intensa actividad constructiva se produce un gran descenso en la mano de obra del sector que nos muestra

como ha sido la disminución de la actividad afectando también al empleo como era de esperar, y confirmando la tendencia del sector en dichos años citada anteriormente.



Figura 2: Miles de personas ocupadas en el sector de la construcción

Fuente: elaboración propia con datos del INE

Otro parámetro que muestra la fuerte caída de la actividad son los permisos de construcción ya que determinan el futuro desarrollo de la actividad constructiva, si consultamos la base de datos de Eurostat, podemos observar que a partir de 2009 se produjo una bajada de los permisos prácticamente de forma exponencial a lo largo de los años, observándose el mayor descenso en 2013. Al igual que se vio afectada España, la Unión Europea en general sufrió también esta crisis siguiendo una trayectoria similar a la nacional

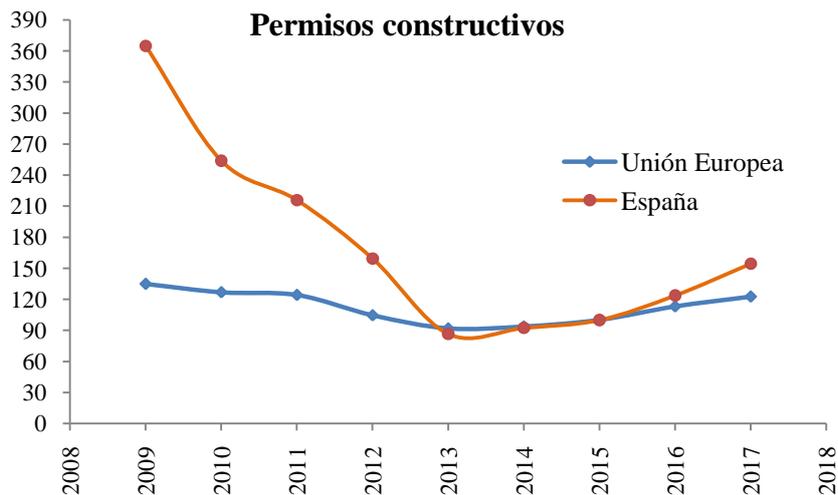


Figura 3: Permisos constructivos de 2009 a 2017

Fuente: Elaboración propia a partir de datos extraídos de Eurostat

El desarrollo demográfico y económico ha provocado una fuerte evolución de la industrialización y la urbanización derivando en un amplio crecimiento de la construcción, que está directamente relacionado con el aumento del abastecimiento de los recursos naturales utilizados para elaborar los materiales empleados en obra. Debido a la limitación de éstos, habrá que hacer frente al problema buscando alternativas sostenibles y que funcionen de forma similar a los naturales. Además de la escasez de los recursos, el sector de la construcción con su actividad produce un gran volumen de residuos que suponen un problema ambiental, se estima que la construcción generó el 34,7 % de residuos en comparación con otras actividades económicas siendo este el valor más elevado (Eurostat, 2014), por lo que habrá que llevar a cabo una gestión adecuada de ellos además de una serie de tratamientos para conseguir un producto útil y poder reintroducirlos en la cadena de producción, evitando así que se sigan acumulando en vertederos y convirtiéndolos, por lo tanto, en materias primas secundarias o recursos; por ello en la actualidad, se están incorporando nuevas técnicas que los hagan útiles consiguiendo ahorrar costes de gestión, minimizar el problema ambiental y así llevar a cabo una economía circular.

1.2.- Los Residuos de construcción y demolición

Los Residuos de construcción y demolición (RCD) son aquellos residuos generados por obras en construcción de nueva edificación y por la demolición total o parcial de la edificación y la obra civil. Estos se han convertido en los últimos años en un problema medio ambiental con mucha importancia debido a la gran acumulación y falta de reutilización produciendo un elevado coste de gestión. El abandono de los RCD o una inadecuada gestión puede derivar en una amplia contaminación de agua, suelo o aire, perjudicar los ecosistemas y la salud humana e incluso contribuir al cambio climático. La cantidad que se produce y la preocupación por el impacto medioambiental que genera es creciente, por eso los países revisan su normativa para determinar cómo deben gestionarse estos residuos, en España viene regulada su producción y gestión por el Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero. Para llevar a cabo esta gestión debe conocerse la composición y la magnitud del problema, así como algún método fiable para su control y estimación. Finalmente, si se consigue una adecuada gestión de ellos podemos disminuir la contaminación ambiental, conservar los recursos naturales y ahorrar las materias primas.

Los RCD son uno de los residuos más pesados y que mayor volumen ocupan, representando entre un 25 % y 30 % de los residuos totales que se generan en la Unión Europea (según Eurostat). En España, aunque no existen datos exactos de su producción, se estima que en 2008 se generaron 35 millones de toneladas según la Guía Española de Áridos Reciclados (GERD), además, se calcula que una gran parte de los residuos de construcción generados (más del 50 %) se han depositado como vertidos incontrolados sin ningún tratamiento, es decir, que solo en torno a 3 millones de toneladas que se generan han sido valorizados como árido reciclado y de los que sí han sido depositados de forma correcta en vertederos (alrededor del 30 % de los generados), crean un gran impacto paisajístico y visual, además del impacto ambiental que, con un tratamiento adecuado podría evitarse.

Como se puede observar en la tabla 1, los RCD son una parte importante respecto al total de residuos generados, por eso en la Unión Europea se han considerado flujo de residuos prioritario ya que suponen un elevado porcentaje del total de residuos producidos.

Tabla 1: Comparación de la generación de residuos totales con RCD en 2017

	Total de residuos producidos (T)	RCD	% RCD frente al total
Unión Europa	842.440.000	293.680.000	34%
España	20.357.742	5.104.107	25%

Fuente: ECOCIVIL

La mayoría de los RCD son inertes, aunque puede presentar una pequeña fracción formada por residuos peligrosos y no inertes, como fluorescentes, plásticos o aditivos del hormigón entre otros. En general, se pueden clasificar en dos grandes grupos: la fracción pétreo que representan el 75 % del peso total y los envases y otros que supondría el 25 %, siendo su composición la siguiente:

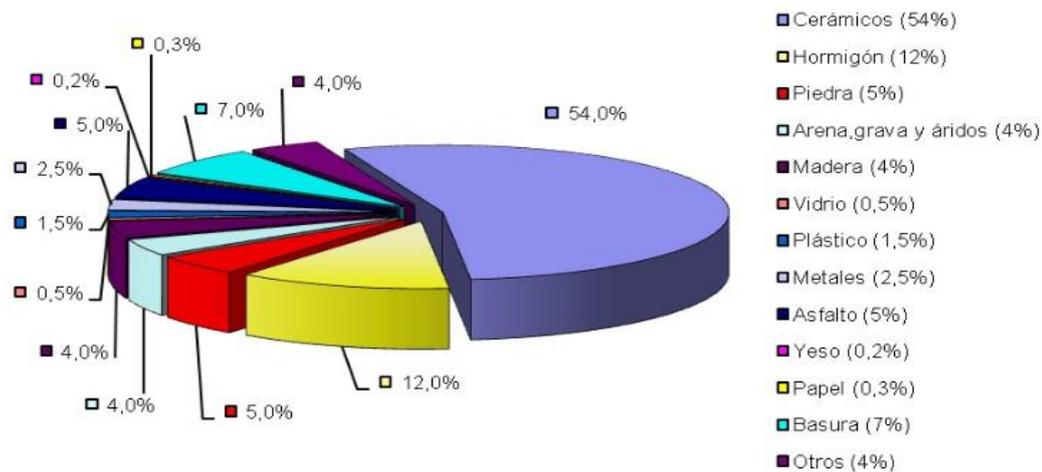


Figura 4: Composición de los RCD

Fuente: Catálogo de residuos utilizables en construcción CEDEX

Esta clasificación vista en la figura 4 con el porcentaje que representan respecto el total de la composición de los residuos, viene más clasificado y regulado con un código de identificación por la Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos (LER). Ese listado europeo sirve para conocer dentro de cada grupo de residuos cuales se deben considerar, es decir, se trata de un código de tres pares de dígitos que los clasifica en grupos, familias y subfamilias, denominándolos como peligrosos o no (los peligrosos se designan con un asterisco) y presentando en cada uno un número de identificación. Podemos encontrar dentro de los Residuos de Construcción y Demolición (bajo el capítulo 17) cuales están considerados como tal y cual es su código de identificación como podemos observar en la tabla 2. También podemos destacar capítulos como el 15 donde nos recoge los envases que pueden generarse en la construcción, además de otros capítulos donde podemos encontrar clasificados otros residuos que se pueden generar a lo largo de la ejecución de una obra.

Tabla 2: Listado europeo de Residuos de Construcción y Demolición

17	RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (INCLUIDA LA TIERRA EXCAVADA DE ZONAS CONTAMINADAS)
17 01	Hormigón, ladrillo, tejas y materiales cerámicos
17 01 01	Hormigón
17 01 02	Ladrillos
17 01 03	Tejas y materiales cerámicos
17 01 06*	Mezclas, o fracciones separadas, de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos, que contienen sustancias peligrosas.

17 01 07*	Mezclas de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos distintas de las especificadas en el código 17 01 06
17 02	Madera, vidrio y plástico
17 02 01	Madera
17 02 02	Vidrio
17 02 03	Plástico
17 02 04*	Vidrio, plástico y madera que contienen sustancias peligrosas o están contaminados por ellas
17 03	Mezclas bituminosas, alquitrán de hulla y otros productos alquitranados
17 03 01*	Mezclas bituminosas que contienen alquitrán de hulla
17 03 02	Mezclas bituminosas distintas de las especificadas en el código 17 03 01
17 03 03*	Alquitrán de hulla y productos alquitranados
17 04	Metales (incluidas sus aleaciones)
17 04 01	Cobre, bronce, latón
17 04 02	Aluminio
17 04 03	Plomo
17 04 04	Zinc
17 04 05	Hierro y acero
17 04 06	Estaño
17 04 07	Metales mezclados
17 04 09*	Residuos metálicos contaminados con sustancias peligrosas
17 04 10*	Cables que contienen hidrocarburos, alquitrán de hulla y otras sustancias peligrosas
17 04 11	Cables distintos de los especificados en el código 17 04 10
17 06	Materiales de aislamiento y materiales de construcción que contienen amianto
17 06 01*	Materiales de aislamiento que contiene amianto
17 06 03*	Otros materiales de aislamiento que consisten en, o contienen, sustancias peligrosas
17 06 04	Materiales de aislamiento distintos a los especificados en los códigos 17 06 01 y 17 06 03
17 06 05*	Materiales de construcción que contienen amianto (6)
17 08	Materiales de construcción a partir de yeso
17 08 01*	Materiales de construcción a partir de yeso contaminados con sustancias peligrosas
17 08 02	Materiales de construcción ya partir de yeso distintos de los especificados en el código 17 08 01
17 09	Otros residuos de construcción y demolición
17 09 01*	Residuos de construcción y demolición que contienen mercurio

17 09 02*	Residuos de construcción y demolición que contienen PCB (por ejemplo, sellantes que contienen PCB, revestimientos de suelo a partir de resinas que contienen PCB, acristalamientos dobles que contienen PCB, condensadores que contienen PCB)
17 09 03*	Otros residuos de construcción y demolición (incluidos los residuos mezclados) que contienen sustancias peligrosas
17 09 04	Residuos mezclados de construcción y demolición distintos de los especificados en los códigos 17 09 01, 17 09 02 y 17 09 03

Fuente: Orden MAM/304/2002

De todas formas, existen muchos tipos de clasificación de los RCD según tipo de obra de la que proceda, grado de limpieza de residuo, tipología... que en muchas ocasiones provoca una cierta confusión a la hora de establecer los residuos y clasificarlos. Además también existen distintas definiciones según la fuente consultada o el país, en algunas ocasiones por ejemplo, las tierras generadas por el movimiento de tierras en obras se consideran residuos de construcción y demolición mientras que en otros países no. Es por eso que buscando información de bases de datos distintas podemos encontrar grandes diferencias en los valores establecidos para un mismo año que hacen difícil su análisis y comparación, lo que hace pensar que los estándares de control de los residuos no son buenos.

1.3.- Tratamiento de los RCD

Debido a la incorporación de nueva legislación sobre residuos, las restricciones respecto al abastecimiento de los recursos naturales, los costes de gestión y los inicios de la incorporación de métodos más sostenibles, se favoreció llevar a cabo métodos de reciclaje y valoración en los años noventa en España que se han seguido ejecutando con mayor eficacia en los años posteriores. Por ello actualmente a partir de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) que se llevan de forma adecuada a plantas gestoras y tras realizar distintos procesos y tecnologías de tratamiento, se obtiene lo que se conoce como áridos reciclados. Los áridos reciclados por lo tanto, son un nuevo material obtenido a partir del reciclaje y la valorización de los RCD pudiendo utilizarse de nuevo y evitando así su acumulación en vertederos y contribuyendo a una sostenibilidad ambiental.

En España, el amplio desarrollo del sector de la construcción y el creciente volumen de producción de residuos por habitante, ha aumentado el desarrollo de RCD llevando a la necesidad de implantar técnicas de demolición controlada y mejorar los procesos de reciclado en plantas de tratamiento. A pesar de esto, España presenta un

retraso frente a otros países de la Unión Europea, sin embargo, el avance que se ha conseguido en los últimos años hace que se obtengan productos de buena calidad y que cumplen la normativa exigible para su catalogación como áridos reciclados.

Las plantas de reciclaje de residuos de construcción y demolición se pueden clasificar según el tipo de instalación que presenten para el tratamiento de los residuos, existiendo así tres tipos de instalaciones. Las plantas de nivel uno o plantas móviles, son las más utilizadas en el mercado, procesan áridos procedentes de demolición para ser reutilizados en la misma obra, generalmente en un uso de menos nivel cualitativo que el original de los materiales reciclados. Reciclan en obra materiales previamente seleccionados. Las instalaciones de nivel dos o plantas fijas son aquellas en las que la misma línea sirve para tratar alternativamente materiales de características diferentes, presentan un emplazamiento fijo con un proceso productivo completo pero con una única línea de producción. Por último, las plantas de nivel tres disponen de múltiples líneas de proceso y una amplia tipología de productos, representan una minoría cualificada de las plantas de reciclaje españolas (GEAR, 2012).

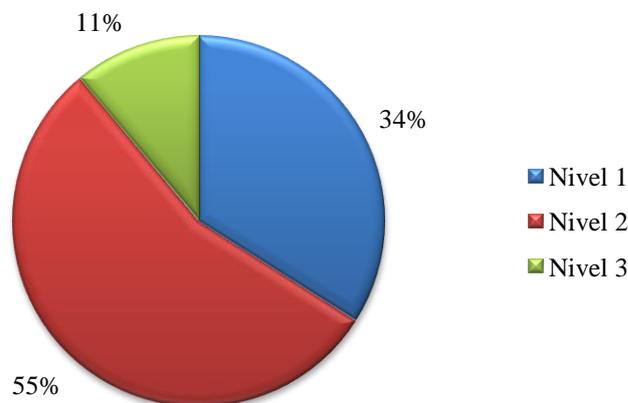


Figura 5: Plantas según nivel tecnológico

Fuente: GEAR, 2012

Para garantizar una buena calidad del producto y una determinada composición se debe de establecer un buen proceso de producción de reciclaje, que estará compuesto por las siguientes etapas básicas: primero un control de admisión, donde se vigilan los registros y documentos y se evalúa o identifican permitiendo realizar una clasificación inicial de la materia prima. Después una clasificación donde se separa de forma manual o mecánica los elementos que se consideran contaminantes dentro de los RCD. Posteriormente hay una reducción de tamaño en el cual se disminuye el tamaño de las

partículas y se separan en diferentes fracciones del material procesado, seguido de una limpieza en la que se realizará una separación más refinada de las partículas de residuos producidas, permitiendo también la eliminación de sustancias peligrosas. Por último un cribado donde se separan las partículas por husos granulométricos específicos otorgando las características finales del producto.

Dentro de lo que es el esquema anterior básico de una planta de gestión de RCD cada una presentará modificaciones según sus criterios, presentando más etapas o comprendiendo más líneas de producción. Además el proceso será diferente dependiendo de la limpieza inicial del residuo de partida, los residuos mixtos o sucios se procesan en plantas de clasificación donde prima la limpieza del material frente a la trituración, mientras que si el RCD de partida es limpio, tras un control de admisión previo, pasarán directamente a un proceso de trituración o machaqueo. En estos se introducen elementos de limpieza de impurezas mediante separadores magnéticos para férricos y cabinas de triaje para plásticos, maderas y papeles.

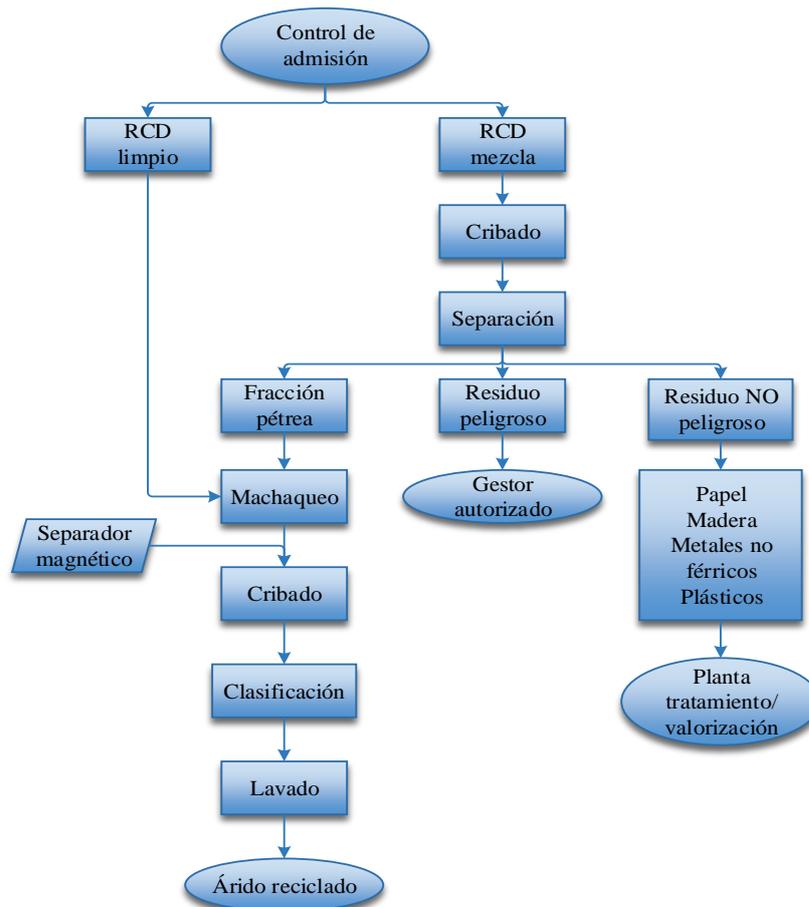


Figura 6: Diagrama de flujo de planta básica de reciclado de RCD

Fuente: Elaboración propia con información de la Guía de divulgación para la gestión de los residuos de construcción y demolición en Cantabria

1.4.- El sector de los áridos en España

El sector de los áridos es el principal suministrador de materia prima para la construcción de infraestructuras, la edificación, la industria y para la protección del medio ambiente, lo que le confiere el carácter de industria estratégica, es tal su importancia que es la segunda materia prima más consumida por el hombre después del agua, consumiéndose en 2017 por cada español 2285 kilogramos anuales.

Según estimaciones de ANEFA, en el 2017 ha habido un crecimiento del consumo nacional de áridos de un 10,5 % , siendo el consumo total de áridos naturales para la construcción de 110,5 millones de toneladas, con variaciones territoriales importantes y existiendo aún dos Comunidades Autónomas donde existe un decrecimiento, añadiendo a esta cantidad cerca de un millón de toneladas de árido reciclado y otro medio millón de árido artificial, el consumo total de áridos para la construcción alcanzó por lo tanto los 112 millones de toneladas.

Tabla 3: Consumo de árido para la construcción en millones de toneladas en 2017

Árido natural	110,5	98,7%
Árido reciclado	1	0,9%
Árido artificial	0.5	0,4%
Total	112	100%

Fuente: ANEFA, Informe de situación económica sectorial 2018

Aunque aún siga existiendo un bajo consumo de áridos reciclados en el sector, hay que resaltar que la aplicación de los principios de la economía circular van avanzando y que se va mejorando el valor respecto a otros años. Además, dentro del valor de los áridos naturales, 4,5 millones de toneladas proceden de otras industrias extractivas donde los producen como un subproducto de los procesos de extracción y tratamiento principales.

1.4.1.- Los áridos reciclados

Los áridos reciclados, como se citó anteriormente, son el producto final obtenido en las plantas de tratamiento de los RCD y por lo tanto, la gran heterogeneidad de los RCD determinarán las características físicas de los áridos reciclados obtenidos. Debido a la herencia del material originario, los áridos procedentes de RCD presentarán una gran heterogeneidad, por lo que resulta útil establecer una clasificación de los áridos reciclados en función de determinados criterios, como por ejemplo: su composición,

calidad técnica, grado de limpieza o tamaño de árido obtenido. Además cada país realiza una clasificación diferente en función de sus necesidades.

En España, la Asociación Española de Gestores de RCD (GEAR, 2012), ha propuesto una clasificación en función de la composición de los áridos reciclados, mostrada en la tabla 4, donde se agrupan por contenido de cuatro componentes que son: cerámicos, asfálticos, hormigón y piedra natural e impurezas (como son maderas, plásticos, vidrios, metales..).

Tabla 4: Clasificación de los áridos reciclados en base a su composición

Acrónimo	Nombre	Componentes en %			
		Hormigón (H) + Piedra natural (P)	Cerámicos (C)	Asfáltico (A)	Otras impurezas (X)
ARH	Áridos Reciclados de Hormigón	$P + H > 90$	$C < 10$	$A < 5$	$X < 1$
ARMh	Áridos Reciclados Mixtos de Hormigón	$P + H > 70$	$C < 30$	$A < 5$	$X < 1$
ARMc	Áridos Reciclados Mixtos cerámicos	$P + H \leq 70$	$C > 30$	$A < 5$	$X < 1$
ARC	Áridos Reciclados Cerámicos	$P + H < 30$	$C > 70$	$A < 5$	$X < 1$
ARMa	Áridos Reciclados Mixtos con asfalto	-	-	$30 < A < 5$	$X < 1$

Fuente: GEAR, 2012

1.5.- Hormigón como solución eco-sostenible

El hormigón es un material formado por la mezcla de cemento, agua y áridos e incluso en muchas ocasiones, distintos tipos de aditivos para mejorar sus características dependiendo del uso que se le quiera dar a la mezcla. Es un material muy empleado en el sector de la construcción, estimando su consumo en 33 billones de toneladas al año, debido a que presenta características y cualidades muy buenas respecto a los otros materiales que existen actualmente en el mercado. Las principales ventajas que lo hacen destacar frente a otros, sería principalmente su excelente resistencia al agua, su capacidad para adoptar los tamaños y formas que se deseen en obra, su precio ya que es generalmente más barato que los demás y de fácil disponibilidad y por último, su producción porque requiere mucha menos energía que otros materiales. Los aspectos

positivos ayudan a que dicho material sea altamente utilizado en el sector de la construcción, pero debe ser un empleo controlado para evitar efectos negativos para el medio ambiente, ya que tanto el amplio abastecimiento de los recursos naturales para la obtención de los materiales empleados para la elaboración, como el gran volumen de residuo que se genera, aunque sean generalmente inertes, los convierte en residuos perjudiciales para el medio ambiente. Todo ello ha motivado a realizar diferentes estudios donde se ha comenzado a sustituir gran parte de los áridos que forman la composición del hormigón por áridos de origen reciclado, incluso en la Instrucción de hormigón estructural EHE-08, ya se incluye un apartado donde se recogen las recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados (anejo 15), el cual parte del Proyecto Recnhor, subvencionado por el Ministerio de Medio Ambiente, que consiste en un estudio prenormativo para el empleo de áridos reciclados para hormigones.

La utilización de árido reciclado procedente de RCD es una alternativa que ya se considera viable en la gestión eficaz de este tipo de residuos desde hace varias décadas, convirtiéndolo así en un recurso. El volumen que está ocupado por áridos de la mezcla comprende entre un 60-80 %, teniendo el hormigón por lo tanto, una gran capacidad de acogida de árido y permitiendo aportar una solución sostenible a la generación de RCD.

1.6.- Marco normativo

Unión Europea

- Directiva 2008/98/CE del Parlamento europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.
- Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos.
- Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de abril de 1999, relativa al vertido de residuos.
- Directiva (UE) 2018/850 del Parlamento europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 1999/31/CE relativa al vertido de residuos.

- Decisión 738/2000 de la Comisión, de 17 de noviembre de 2000, sobre el cuestionario para los Estados miembros acerca de la aplicación de la Directiva 1999/31/CE relativa al vertido de residuos.

Legislación a nivel nacional

- Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.
- Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición.
- Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósitos en vertederos.
- Resolución de 16 de noviembre de 2015, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros de 6 de noviembre de 2015, por el que se aprueba el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022.
- ORDEN MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos.
- Instrucción de hormigón estructural (EHE-08, 2008).

Castilla y León

- Ley 5/1999, de 8 de abril, de Urbanismo de Castilla y León.
- Ley 9/2002, de 10 de julio, para la declaración de proyectos regionales de infraestructuras de residuos de singular interés en la Comunidad.
- Decreto 11/2014, de 20 de marzo, por el que se aprueba el Plan Regional de Ámbito Sectorial denominado «Plan Integral de Residuos de Castilla y León».

2.- OBJETIVOS

Con todos los datos recopilamos se puede observar que la acumulación de Residuos de Construcción y Demolición se ha convertido en un tema con mucha relevancia medioambiental y es urgente buscar soluciones técnicas viables, rápidas y sostenibles para este problema. Dentro de las posibles soluciones, ya existen estudios que apuntan al uso de los áridos obtenidos de plantas de gestión de residuos para la elaboración de hormigón debido a sus buenas características y su amplio uso en la construcción. En edificaciones, el árido constituye el elemento mayoritario de los morteros así como de sus múltiples tipos de prefabricados, ya que para fabricar 1m^3 de mortero se necesitan 1,3 toneladas de áridos. Algo similar ocurre con el hormigón empleado para la construcción, bien en masa o bien en estructuras, ya que para su aplicación se necesitan aproximadamente 1,9 toneladas para fabricar 1m^3 de hormigón.

Observándose el gran potencial que tendría el hormigón como solución a la acumulación de residuos pudiendo introducir árido reciclado en vez de natural, lo que se ha buscado principalmente con este estudio es:

- Realizar una comparación entre hormigón natural y reciclado elaborados con el mismo método de dosificación y, posteriormente, con otros métodos distintos para observar las diferencias que presentan además de los resultados que se obtienen mediante el ensayo de rotura a compresión.
- Comparar cómo es la posible influencia del aditivo al incorporarlo en la elaboración de hormigón reciclado con otra amasada elaborada con la misma dosificación pero sin presentar dicho componente.
- Elaborar una prueba de un uso directo no estructural del hormigón como es el caso del hormigón de limpieza, con una alta relación agua/cemento ya que no viene limitada por norma y observar los datos obtenidos, para establecer otra utilidad posible del árido reciclado.

3.- TRABAJO EXPERIMENTAL

Además de todos los materiales utilizados en los ensayos, los áridos son la parte fundamental de este estudio, por lo que hemos utilizado unos áridos procedentes de planta gestora. La planta que los ha proporcionado para la elaboración de estos ensayos, tanto reciclados como naturales ha sido Reutiliza S.L.

Reutiliza S.L. es una empresa encargada de la gestión de residuos ubicada en el municipio de Santas Martas (León), siendo una de las pocas empresas reconocidas en la provincia por la Junta de Castilla y León, como gestor de residuos de construcción y demolición fuera de la zona de El Bierzo. Forma parte de un grupo de empresas familiar integrado hasta ahora por una empresa constructora (Contratas y Saneamiento, Coysa, S.L.) y una planta de áridos y hormigones (Áridos Valdearcos S.L.), cerrando el círculo con la gestora de residuos, que es sin duda una gran apuesta tanto empresarial como social para los próximos años.

El presente estudio ha sido realizado en el laboratorio de Resistencia de Materiales y Construcciones de la Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal de la Universidad de León (ULE), el cual pertenece al Grupo de Investigación Ingeniería de materiales y Eco-eficiencia (INMATECO).

3.1.- Material

3.1.1.- Cemento

El cemento es un material aglutinante que presenta propiedades de adherencia y cohesión y que permite la unión de elementos minerales entre sí formando un todo compacto. En la construcción del hormigón la unión de los áridos se logra por medio de cemento que generalmente son cementos portland, los cuales pertenecen a la familia de conglomerantes hidráulicos formados por materiales pulverulentos artificiales de naturaleza inorgánica que reaccionan con el agua dando lugar a un producto sólido, resistente y estable, tanto en el aire como en el agua (Fernández Cánovas, 2011). Por ello juega un papel importante y ha ido logrando protagonismo a lo largo de los años hasta convertirse en uno de los materiales de construcción con un mayor consumo ya que, además de conferir buenas características de resistencia y durabilidad al hormigón, están formados básicamente de mezclas de caliza, arcilla y yeso que son materiales abundantes en la naturaleza, presenta un precio relativamente bajo en comparación con

otros materiales y tiene unas propiedades muy adecuadas para las metas que pretenden alcanzar.

Además de tener que cumplir la legislación vigente, existe en el Anejo 4 de la EHE-08 (2008), una serie de recomendaciones a la hora de escoger el cemento a emplear en hormigones estructurales. En este estudio se ha optado por elegir un cemento portland con escoria de horno alto (CEM III), adecuados tanto para la aplicación de hormigones en masa como armados, pudiendo ser en ambos casos para obras en grandes volúmenes. Estos conglomerados constituyen la familia de los cementos fríos, considerando dentro de ellos por la Instrucción española, dos tipos de cementos de horno alto, en este caso se ha seleccionado de TIPO III/A, los cuales están constituidos por clínker de portland (35 a 64%), escoria siderúrgica (36 a 65%) y otros constituyentes (0 a 5%). Los porcentajes son en masa y no incluyen ni el regulador de fraguado ni los aditivos.

Como el presente estudio pretende obtener valores lo más genéricos posibles para posibles comparaciones posteriores con otros, no se ha tenido en cuenta las recomendaciones de la clase de exposición según la EHE-08.

La determinación final de utilizar este tipo de cemento se debe a que, como se vio anteriormente en la tabla 4, existe la posibilidad de utilizar áridos reciclados mixtos cerámicos donde se ve aumentada la posibilidad de existir reactividad y según estudios encontrados, la reactividad de la escoria de horno alto se considera un parámetro importante para evaluar su idoneidad como material de reemplazo para el cemento en hormigón (Bougara et al., 2010). En el presente estudio, no se va a emplear este tipo de árido reciclado pero así, en el caso de querer introducir el anteriormente citado y poder seguir el método aquí establecido, se podría realizar una comparación más homogénea sin necesidad de modificar el cemento a emplear y permitiéndonos por lo tanto, trabajar con un mayor abanico de posibilidades comparables entre sí.

Además, debido a que se van a elaborar probetas de hormigón en masa que a los 28 días se las va a realizar un ensayo de resistencia a compresión, y que la resistencia característica se ha fijado en 25 MPa, se ha tomado un cemento con resistencia de 42,5 N para evitar limitaciones debidas al tipo seleccionado.

Como característica final se puede destacar que son resistentes a los sulfatos, por lo que presentan bajo calor de hidratación, menor retracción, desarrollan sus resistencias

más lentamente que los de tipo ordinario pero disminuyen la trabajabilidad de las mezclas.

En general y teniendo en cuenta todos los datos obtenidos de este tipo de cementos, se ha elaborado la tabla 5 con algunos datos genéricos interesantes y a tener en cuenta a la hora de escoger este tipo de cementos, ya que incluyen características, limitaciones, indicaciones, para qué elementos no están indicados y por último, precauciones a tener en cuenta.

Tabla 5: Características y criterios de empleo de los cementos de horno alto

CARACTERÍSTICAS Y CRITERIOS DE EMPLEO DE LOS CEMENTOS DE HORNO ALTO				
III/A-42,5 SRC				
Características	Limitaciones	Indicado para	No indicado para	Precauciones
-Bajo calor de hidratación	-Sensibles a las bajas temperaturas	-Obras hormigón en masa incluso de gran volumen	-Obras que requieran grandes resistencias iniciales	-Prolongar amasado evitando exceso de agua
-Baja retracción	Endurecimiento lento	-Hormigón en masa o armado en ambientes húmedos y ligeramente agresivos por salinidad o por sulfatos	-Hormigones vistos	-Prolongar curado en climas fríos o temperaturas bajas evitando al máximo la desecación prematura
-Mayor resistencia química que el portland		-Cimentaciones, pavimentos y obras subterráneas	-Obras en ambientes muy secos	-Prolongar tiempo de desencofrado
-Disminución de la trabajabilidad		-Obras marítimas	-Obras en ambientes muy agresivos	
		-Ciertos prefabricados	-Hormigonados a bajas temperaturas	
			-Obras de gran superficie y bajo espesor	

Fuente: Elaboración propia con información extraída de Jiménez Montoya et al., Hormigón armado (2000)

3.1.2.- Agua

El agua es un componente que presenta gran importancia ya que se va a emplear tanto para el amasado como para el curado del hormigón.

El agua de amasado, la cual se añade a la hormigonera, tiene dos principales funciones: una primera de lubricante haciendo que la masa fresca sea más trabajable y, por lo tanto, la puesta en obra sea correcta; y una segunda de hidratación, participando así en las reacciones con los componentes activos del cemento. Por otro lado, el agua de curado del hormigón tiene como función durante el proceso de fraguado y primer endurecimiento evitar la desecación, mejorar la hidratación del cemento e impedir una retracción prematura (Jiménez Montoya et al., 2000).

La única consideración importante a tener en cuenta a la hora de utilizar el agua, es que esta no presente impurezas por encima de determinados valores y esté limpia para evitar posibles alteraciones en las características del hormigón. En este caso, para todas las probetas se empleó agua potable utilizada en ensayos anteriores y por lo tanto, respetando las recomendaciones presentes en la EHE-08.

3.1.3.- Árido natural

Los áridos son materiales granulares inertes que, aunque no intervienen en el fraguado y endurecimiento del hormigón, si contribuyen a la estabilidad del volumen, resistencias y economía de los morteros y hormigones, ya que aproximadamente equivalen al 80 % del volumen del hormigón. Además de presentar un menor costo que la pasta de cemento, y contribuir a conformar el hormigón final, influye de forma positiva en las resistencias mecánicas, retracción, fluencia, abrasión e incluso durabilidad.

Los áridos pueden ser de distinta naturaleza ya que, dependiendo de las rocas de las que procedan, presentarán diversas propiedades, como ocurre con su composición química, dureza, densidad, resistencia, etc.; otras propiedades por el contrario vendrán relacionadas con el proceso de formación, como son su absorción, tamaño o textura entre otros muchas (Fernández Cánovas, 2011). Finalmente, todas estas propiedades de la materia prima, influirán en gran medida en las características del producto final, en este caso el hormigón, tanto fresco como endurecido.

Los áridos naturales empleados en este caso han sido áridos rodados y arenas de naturaleza silíceas (gravas y arenas de río o cantera), las cuales presentan un uso más

extendido en relación con las otras existentes en el mercado, esto se debe principalmente a que son las más económicas y que además, proporcionan hormigones trabajables y dóciles con menores cantidades de agua. Su calidad y granulometría suele ser variable, lo que obliga a realizar un tamizado previo del material o un estudio inicial para poder clasificarlo en tamaños adecuados para cada determinado uso.

Los áridos utilizados para el presente estudio se caracterizaron anteriormente en otro estudio (Antolín Rodríguez, 2018) respecto a diversos parámetros para comprobar que cumplen con los valores establecidos por la EHE-08 y la norma europea EN 12620:2003+A1 (2009), donde se determinan las características que deben de cumplir para poder ser empleados para la elaboración posterior de hormigones.

En la tabla siguiente se muestran los parámetros determinados, el valor obtenido tras el ensayo, la norma que se ha seguido para llevar a cabo los ensayos y los límites impuestos para cada valor si existiesen determinados por la EHE-08. Algunas características como la densidad y la absorción de agua se tratarán más adelante por la gran importancia que conllevarán a la hora de realizar las dosificaciones. También se encuentra la representación gráfica del módulo granulométrico de dicho árido.

Tabla 6: Características del árido natural con fracción granulométrica 6/25 mm

Parámetro	Resultado del ensayo	Valor límite	Normas aplicadas
Módulo granulométrico	2,27	-	UNE-EN 933-1 (2012)
Índice de lajas	9,5%	Inferior a 35	UNE-EN 933-3 (2012)
Coefficiente de los Ángeles	34%	No superior a 40%	UNE-EN 1097-2 (2010)

Fuente: Elaboración con datos de Antolín Rodríguez (2018)

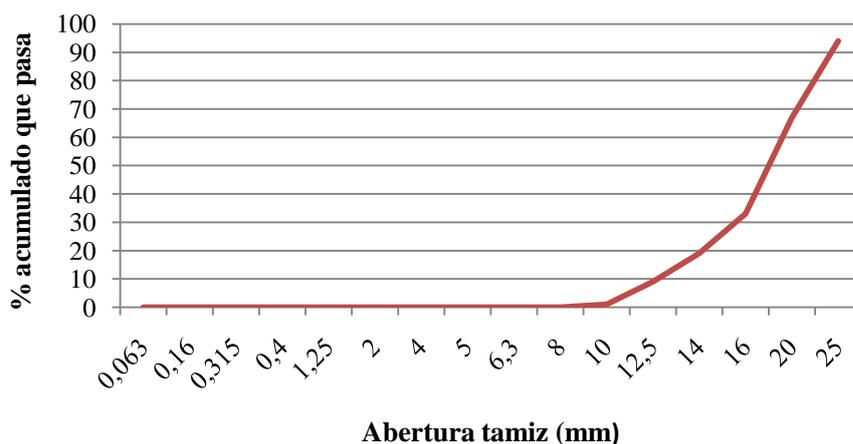


Figura 7: Módulo granulométrico del árido natural

Fuente: Elaboración propia con datos extraídos de Antolín Rodríguez (2018)

Se denomina arena o árido fino a la fracción inferior a 5 mm, además es común hacer una división dentro de la arena diferenciándola a partir de los 2 mm entre arena gruesa y fina. Solo se analizó la fracción granulométrica 2/10 mm representando los parámetros estudiados en la tabla siguiente y posteriormente el módulo granulométrico.

Tabla 7: Características del árido natural con fracción granulométrica 2/10 mm

Parámetro	Resultado del ensayo	Valor límite	Normas aplicadas
Módulo granulométrico	2,08	-	UNE-EN 933-1 (2012)
Índice de lajas	3,6%	Inferior a 35	UNE-EN 933-3 (2012)

Fuente: Elaborado con datos de Antolín Rodríguez (2018)

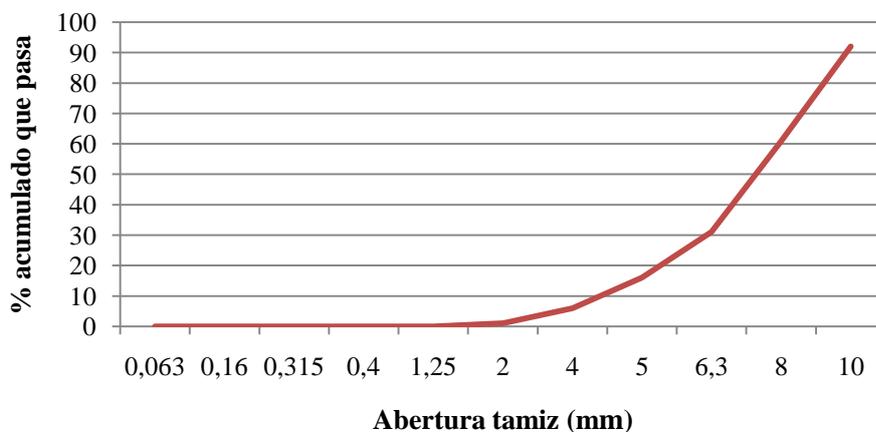


Figura 8: Módulo granulométrico del árido natural (2/10 mm)

Fuente: Elaboración propia con datos extraídos de Antolín Rodríguez (2018)

La arena es el árido con mayor responsabilidad, incluso puede decirse que sin una arena de calidad no es posible elaborar un buen hormigón, es por eso que en la elaboración del hormigón reciclado en el presente estudio, se mantendrá la arena natural silíceo para cerciorarse de obtener un hormigón en las mejores condiciones posibles y evitar incorporar un parámetro más y de tal importancia que puede variar en gran medida los resultados finales. Además la EHE-08 también muestra restricciones sobre la fracción granulométrica a emplear de árido reciclado para la elaboración del hormigón, limitando su uso a la fracción gruesa y quedando de este modo la fracción fina o arena desestimada para la fabricación del hormigón reciclado.

3.1.4.- Árido reciclado

Dependiendo de su composición, los áridos reciclados pueden ser de distintos tipos como se adelantó anteriormente (tabla 4). En este caso, para la elaboración del hormigón se ha empleado árido reciclado procedente de hormigón (ARH), es el árido más extendido y utilizado en estudios e investigaciones (Thomas et al., 2018; Pacheco et al., 2019; Xuan et al., 2017; Lofti et al., 2015; Zaetang et al., 2016).

Este tipo de árido reciclado presenta cierta heterogeneidad en sus propiedades, principalmente por las características del hormigón de procedencia, las impurezas o el sistema de triturado, estando su calidad influenciada por la fracción considerada, ya que las fracciones finas presentan peores calidades.



Figura 9: Árido reciclado procedente de hormigón suministrado por Reutiliza S.L.

Fuente: INMATECO

Este árido procede de la empresa de gestión de residuos Reutiliza S.L. ubicada en León (España). En el proceso de obtención del árido, el RCD recibido pasa por un reconocimiento visual, caracterización y pesaje en el momento que llega a la planta gestora. Posteriormente se realiza un triaje para conseguir separar los residuos

mezclados para después, cuando el material ya esté limpio, realizar dos procesos de machaqueo: el primero mediante una trituradora con una pinza adosada a ella (similar a la trituradora de mandíbulas) y el segundo con un molino de impacto. Tras esto, el material se recirculará para realizar una clasificación por medio de separadores magnéticos, cribas y cintas transportadoras para separar los componentes. Finalmente se realiza un cribado y un lavado posterior obteniendo un árido con las características óptimas para ser utilizado.



Figura 10: Planta suministradora del árido reciclado Reutiliza S.L.

Fuente: Reutiliza S.L.

Respecto a su composición se determinó en ensayos anteriores siguiendo la norma EN-933-11 (2009) y se obtuvo la masa total y la proporción, resultando finalmente los siguientes componentes:

- Rc: hormigón, productos de hormigón, mortero. Unidades de albañilería del hormigón.
- Ru: áridos no tratados, piedra natural. Áridos tratados con conglomerantes hidráulicos.
- Rb: unidades de albañilería de arcilla (ladrillos, azulejos). Unidades de albañilería de silicato cálcico. Hormigón aireado no flotante.
- X: otros: cohesivos (arcilla, arena). Varios: metales, madera no flotante, plástico y caucho. Yeso.

Tabla 7: Resultados de la clasificación de los componentes del árido

Componente	Masa (g)	Proporción (%)
Rc	704,39	70
Ru	271,40	27
Rb	23,13	2,3
X	0,85	0,04

Fuente: Antolín Rodríguez (2018)

La EHE-08 establece una limitación en el porcentaje de impurezas que puede existir en los áridos reciclados, en este caso cumple la legislación ya que los componentes que forman Rb existen en un 2,3 % estando dentro del 5 % establecido; de igual forma ocurre con los componentes de X, los cuales presentan un 0,04 % pudiendo tener hasta un 1 % según la normativa.

De la misma manera que en el árido natural, se obtuvieron una serie de características de estos áridos muy interesantes para tener en cuenta a la hora de llevar a cabo la dosificación representados en la tabla 8 y también para conocer si el árido es válido para emplearlo para la elaboración de hormigones. Posteriormente se encuentra la representación gráfica del módulo granulométrico del presente árido reciclado.

Tabla 8: Características del árido reciclado con fracción granulométrica 6/20 mm

Parámetro	Resultado del ensayo	Valor límite	Normas aplicadas
Módulo granulométrico	2,46	-	UNE-EN 933-1 (2012)
Índice de lajas	5,8%	Inferior a 35	UNE-EN 933-3 (2012)
Coefficiente de los Ángeles	36%	No superior a 40%	UNE-EN 1097-2 (2010)
Equivalente de arena	98	Superior a 70	EN 933-8:2012+A1:2015

Fuente: Datos extraídos de Antolín Rodríguez (2018)

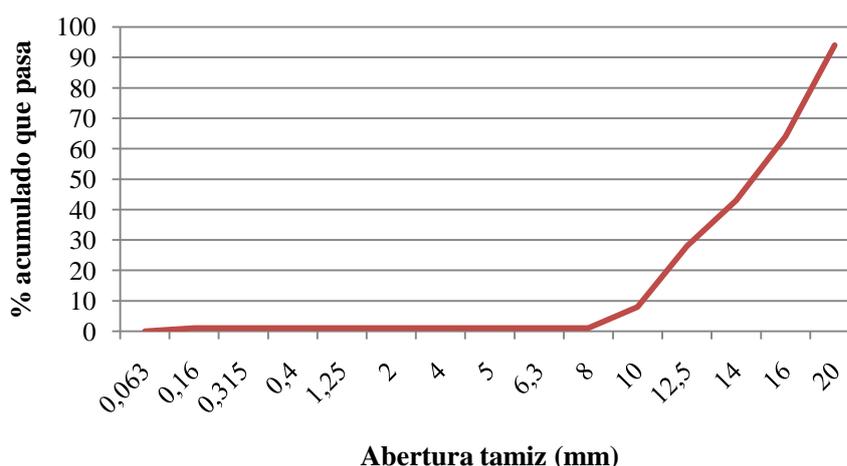


Figura 11: Módulo granulométrico del árido reciclado

Fuente: Elaboración propia con datos extraídos de Antolín Rodríguez 2018

Tras comprobar que el árido es apto para ser empleado en la elaboración de hormigón y aunque la EHE-08 recomiende en el anejo 15 no realizar una sustitución de árido grueso natural por reciclado mayor del 20 % sobre el contenido total, en este estudio se pretende realizar una sustitución del 100 % de los áridos gruesos y comprobar posteriormente cuales serán las resistencias obtenidas tras el ensayo de rotura a compresión.

3.1.5.- Aditivo superplastificante

Habitualmente los hormigones elaborados con áridos reciclados presentan consistencias más secas que los elaborados con árido convencional, por lo que una de las soluciones que se propone para solventar este problema es la utilización de aditivos.

Los aditivos tienen como función producir una modificación determinada en las características del hormigón, pero pueden ocurrir otras funciones secundarias modificando más características de las esperadas llegando incluso a transformar factores no deseados de forma inevitable convirtiéndose en contraindicaciones. Además es importante tener en cuenta que un aditivo nunca va a convertir un hormigón malo en bueno pero si se espera que mejore sus características convirtiéndolo en mejor.

En este caso el aditivo seleccionado ha sido un superplastificante, ya que posee la ventaja de conseguir reducir el agua de amasado en casi un 30 % sin presentar efectos retardados sobre el fraguado o el primer endurecimiento. Concretamente el aditivo con el que se ha trabajado ha sido el MasterEase 5025 que presenta las propiedades representadas en la tabla 8.

Tabla 8: Propiedades del superplastificante MasterEase 5025

Propiedades	
Función	Superplastificante/reductor de agua
Efectos secundarios	Riesgo de disgregación a dosis elevadas
Densidad (g/cm ³)	1,058 + 0,02
pH	5,3 ± 1
Dosificación (% de cemento en masa)	0,5 - 1,5
Cloruros (%)	< 0,1
Modo de empleo	Añadir durante el amasado, con la última parte del agua de amasado

Fuente: Elaboración propia

3.2.- Fundamentos de dosificación

3.2.1- Relación agua/cemento y absorción de agua

La relación agua/cemento en la elaboración del hormigón es uno de los parámetros más importantes, ya que rigen sus propiedades en fresco y en su estado de endurecimiento y determinará la resistencia y la durabilidad de este. A pesar de presentar tal importancia, no pueden darse valores fijos que relacionen dichas magnitudes ya que depende de otros muchos factores. Esta relación debe ser lo más baja posible para obtener mayores valores de resistencia pero teniendo en cuenta que se debe conseguir una buena trabajabilidad y compactación del hormigón y que además, debe evitarse la segregación de los áridos gruesos. Es por esto que en algunas ocasiones se debe utilizar cantidades mayores de cemento de lo necesario para conseguir estas características o incluso emplear algún tipo de aditivo.

En la elaboración de hormigón reciclado se debe tener en cuenta que los áridos reciclados presentan mayor absorción de agua que los áridos naturales y que, por lo tanto, el contenido en agua que queda disponible para influir sobre la consistencia será menor en el mezclado, esto se debe generalmente a la mayor porosidad que presentan y menor densidad respecto de los naturales aumentando la absorción de agua (Geng et al., 2019).

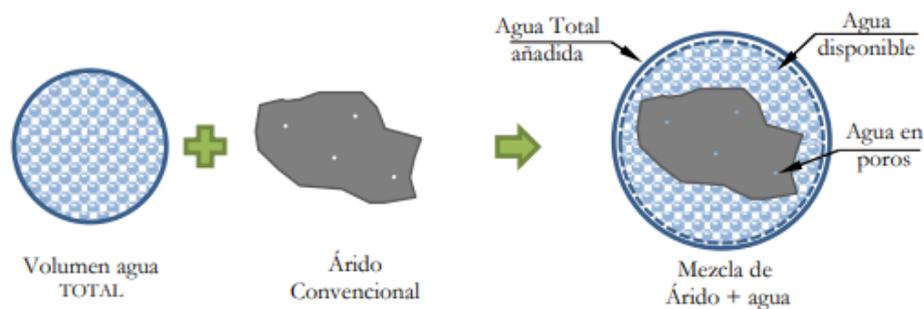


Figura 12: Esquema de volumen de agua disponible en mezcla con árido convencional

Fuente: Laserna Arcas (2015)

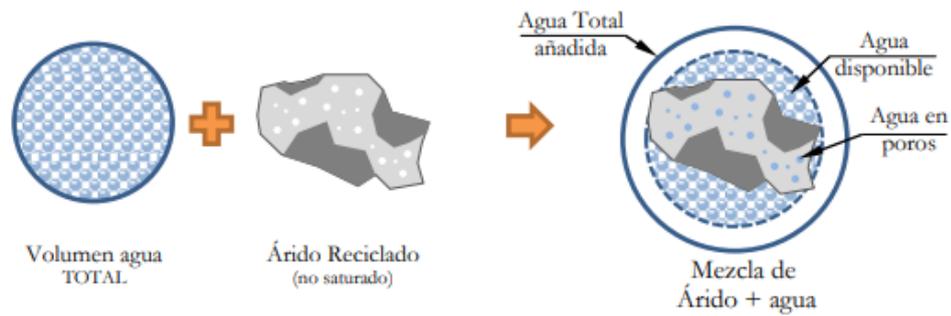


Figura 13: Esquema de volumen de agua disponible en mezcla con árido reciclado

Fuente: Laserna Arcas (2015)

Es por ello que muchos autores son los que sostienen que se requiere un mayor contenido de agua para la elaboración de hormigón con áridos reciclados que con naturales para conseguir la misma trabajabilidad, suponiendo en hormigones reciclados en los que se realiza una sustitución del árido grueso y un mantenimiento del árido fino convencional (como es el caso del presente estudio), entre un 5 y un 10% más de contenido en agua que para hormigones totalmente naturales para mantener la misma consistencia (ACHE, 2006).

Tal es la importancia de este hecho para realizar la dosificación contribuyendo además a la relación agua/cemento e influyendo por lo tanto en su consistencia y durabilidad, que se debe conocer previamente a su uso el porcentaje de absorción del árido, además se puede considerar como la diferencia más marcada entre áridos reciclados y convencionales. Esta característica al igual que los parámetros anteriormente tratados de cada tipo de árido, fueron determinados anteriormente por el mismo estudio. A continuación, está la representación gráfica de los porcentajes de absorción del árido natural en comparación con el reciclado para la fracción gruesa. Los ensayos se realizaron de acuerdo con lo establecido en la norma EN 1097-6 (2014).

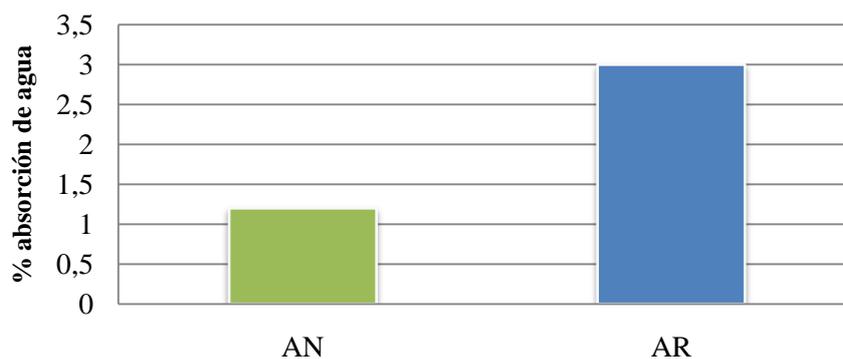


Figura 14: Comparación del coeficiente de absorción de los áridos gruesos ensayados

Fuente: Antolín Rodríguez (2018)

Con estos datos se confirma lo determinado por otros artículos y estudios, es decir, que los áridos reciclados presentarán mayor porcentaje de absorción que los naturales. Además, la EHE-08 (2008) establece un límite máximo de absorción de agua permitido tanto para los reciclados gruesos como para los finos, siendo en ambos casos del 5 %. Teniendo en cuenta lo anterior, como para el árido reciclado grueso se obtuvo un 3 %, nos encontraríamos dentro de lo establecido por la normativa.

3.2.2.- Densidad

Los áridos presentan poros en su estructura que pueden ser accesibles o inaccesibles y que dependen fundamentalmente de su composición. Esto hace que no se puede hablar de una única densidad sino de varias, las cuales dependerán de que el volumen que esté contemplando se incluyan o no los dos tipos de poros y que la muestra de árido pueda estar seca en estufa o llenando sus poros con agua, es decir, que se encuentre saturado de agua pero con superficie seca (Fernández Cánovas, 2011).

La densidad es un parámetro con mucha relevancia a la hora de realizar la dosificación del hormigón y que está directamente relacionado con la absorción de agua, por eso es importante tener a ambos muy en cuenta.

La densidad del árido reciclado procedente de hormigón suele ser similar a la que presentaba el árido original de procedencia pero inferior a la del árido convencional entre un 5-10 %. Esto se debe principalmente a la presencia de mortero adherido en la superficie del árido tras el proceso de reciclaje procedentes del árido de origen. El mortero lo que realiza es un aumento de la porosidad del árido que produce una disminución de la densidad y, por lo tanto, un aumento en la absorción de agua como ya

se adelantó anteriormente. Es por esto que para densidades reales de árido convencional se puede encontrar unos valores que vayan de 2,4 a 3,0 kg/dm³, mientras que para áridos reciclados procedentes de hormigón oscilen entre 2,07 - 2,75 kg/dm³. En el caso de la densidad aparente la cual ha sido la determinada para los presentes áridos, se obtuvieron los siguientes valores:

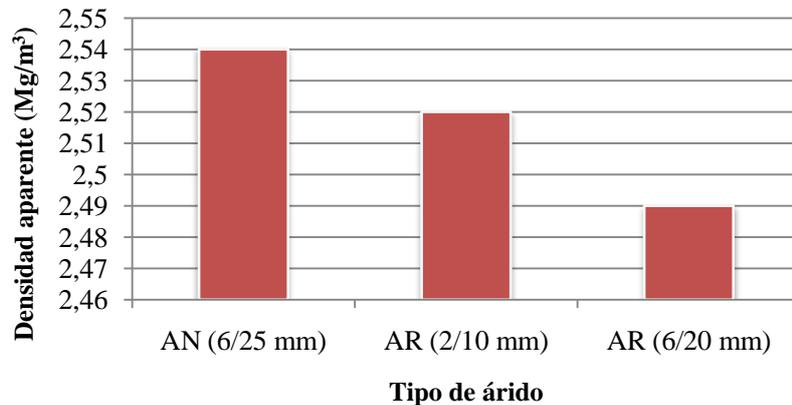


Figura 15: Comparación de las densidades aparentes de los distintos áridos

Fuente: Elaborado con datos de Antolín Rodríguez (2018)

No existen limitaciones sobre la densidad en la EHE-08, pero si son valores necesarios a la hora de realizar las dosificaciones.

3.3.- Métodos de dosificación

3.3.1.- Aspectos previos

El método de dosificaciones tiene como objetivo encontrar las proporciones de cada componente que hay que mezclar para conformar el hormigón con unas determinadas características iniciales que se establezcan. No existe un solo método sino que dependiendo de las condiciones que queramos o deba reunir el hormigón a elaborar, se deberá tomar una decisión acerca de esto, y los resultados que se obtengan serán buenos si se ha escogido de forma adecuada el método y se han realizado las correcciones convenientes después de hacer masas de prueba. Estos métodos pueden dividirse en dos grandes grupos: aquellos que consideran como dato de partida la dosificación del cemento, teniendo en cuenta además algunas características como puede ser el tamaño máximo de árido, la consistencia, tipos de árido, etc.; o aquellos que se basan como dato inicial en alguna propiedad final del hormigón como puede ser la resistencia a compresión, además de ir acompañados de otros datos necesarios.

De los métodos que emplean para la dosificación la cantidad de cemento a emplear, se elaboraron tres de ellos: el método de Fuller, el de Bolomey y el de Faury. Todos los elegidos emplean granulometrías continuas y, aunque no son los únicos que existen, probablemente sean los más utilizados.

De los métodos basados en una propiedad, se empleará el método de La Peña de dosificación por resistencia, siendo también uno de los más usados de este tipo.

Previamente a llevar a cabo las distintas dosificaciones hay que tener en cuenta unas limitaciones por razones de durabilidad establecidas por la EHE-08 respecto a la relación agua/cemento y al contenido mínimo de cemento a emplear, ya que en función de las condiciones ambientales en las que nos encontremos y el tipo de hormigón que se vaya a realizar (en masa, armado o pretensado), se determinará un valor máximo para estos.

Tabla 9: Máxima relación agua/cemento y mínimo contenido de cemento

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	CLASE DE EXPOSICIÓN												
		I	Ila	Ilb	Illa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E
Máxima Relación a/c	masa	0,65	-	-	-	-	-	-	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	armado	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,50	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	pretensado	0,60	0,60	0,55	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,45	0,45	0,55	0,50	0,50
Mínimo contenido de cemento (kg/m ³)	masa	200	-	-	-	-	-	-	275	300	325	275	300	275
	armado	250	275	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300
	pretensado	275	300	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300

Fuente: EHE-08 (2008)

Como en León (España), donde se ha realizado el estudio, presenta una clase de exposición I Ib y se va a elaborar hormigón en masa que no contiene ningún valor limitante, se tomaron los valores del hormigón armado, es decir, relación agua/cemento 0,55 y cantidad mínima de cemento de 300 kg/m³ para tener en algunos casos un valor inicial de referencia para estos parámetros.

En el caso de emplear aditivo, se dosificará como porcentaje sobre las cantidades de cemento empleadas, ajustando posteriormente a la consistencia y relación agua/cemento deseadas.

Para la determinación de cada uno de los componentes a aplicar se calcula para la obtención de 1 m³ de volumen de hormigón mezclado teniendo en cuenta que es necesario prever 1025 litros, ya que la mezcla de cemento y agua es 2,5 % menor de lo que ocupan los componentes por separado, además como no se van a elaborar amasadas

tan grandes, habrá que establecer finalmente los metros cúbicos a realizar para determinar posteriormente el contenido de cada elemento respecto al nuevo volumen.

Por último, lo que se pretende lograr son dosificaciones lo más homogéneas posibles, es decir, intentando mantener iguales o lo más similares los parámetros previos a establecer entre los métodos de Fuller, Bolomey y La Peña para realizar comparaciones entre hormigón natural y reciclado y, de los valores obtenidos, entre todos los métodos. Además, lo que se buscará con la dosificación de Faury, será intentar realizar una comparación entre aplicar superplastificante o no a diferentes amasadas con iguales condiciones. Para finalizar, se buscará realizar mediante este último método citado, un hormigón de limpieza para obtener otra posible alternativa directa al uso de estos áridos reciclados.

3.3.2.- Método de Fuller

Es uno de los métodos más clásicos y fáciles de aplicar de los que se basan en un valor fijo de contenido en cemento y consiste en ajustar los áridos que se van a emplear en la curva de Fuller.

Para comenzar a realizar los cálculos el método establece unas determinadas pautas para áridos de granulometría media:

- Relación agua/cemento de partida 0,57.
- Asiento de 76 mm en el cono de Abrams correspondiente a una consistencia blanda.

Además, en función del tipo de árido (rodado o machacado) y del tamaño máximo de este a emplear, para los valores anteriormente establecidos, viene determinada la cantidad de agua para el amasado.

Tabla 10: Cantidad de agua en función del tamaño máximo de árido y el tipo

D mm	Árido rodado l/m³	Árido machacado l/m³
12	202	217
16	192	210
20	183	202
25	180	191
31,5	172	187
63	161	175

Fuente: Fernández Cánovas (2011)

En este caso, el tamaño máximo de árido que se empleó fue el de 16 mm de diámetro, ya que en pruebas anteriores con un árido mayor no se obtenían mezclas del todo homogéneas, aun así, desde el punto de vista de aplicación del método, el tamaño máximo del árido es de 20 mm ya que es el tamiz que retiene menos del 25 % del árido de mayor tamaño. En un primer momento, se pretendió utilizar la misma cantidad de agua tanto para árido natural como para reciclado para que las amasadas fueran iguales y se pudieran comparar de forma más homogénea, por lo que se cogió para ambas (natural y reciclado) el valor de 210 l/m³ ya que se tomó como referencia la elaboración del hormigón con árido reciclado, es decir, machacado. Respecto a la consistencia, debido a que se pretende obtener una consistencia blanda y se tomó como punto de partida el árido reciclado el cual presenta mayor absorción de agua, se mantuvo el cálculo para el asiento de 76 mm.

Tabla 11: Asiento del cono de Abrams correspondiente a distintas consistencias

Consistencia	Cono de Abrams (cm)
Seca	0 - 2
Plástica	3 - 5
Blanda	6 - 9
Fluida	10 - 15
Líquida	16 - 20

Fuente: Fernández Cánovas (2011)

Se modificará la relación agua/cemento a la establecida según la clase de exposición de la zona (0,55) como se indicó anteriormente y si hubiera los cambios establecidos en la siguiente tabla, se realizarían las determinadas variaciones.

Tabla 12: Modificaciones de las condiciones de la tabla 10

Causa	Modificación del agua
Por cada 25 mm de +/- del asiento Tomando como referencia 76 mm	+/- 3 %
Arena artificial, de machaqueo	+6,8 litros
Hormigones de pavimentos	-3,6 litros

Fuente: Fernández Cánovas (2011)

La curva granulométrica para este método viene definida por la siguiente ecuación:

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

Siendo:

y : porcentaje en volumen acumulado que pasa por el tamiz d .

d : abertura del tamiz en cuestión en mm.

D : tamaño máximo de árido en mm.

Para realizar el ajuste granulométrico de la mezcla de los diferentes áridos a la curva de Fuller, se ha empleado el método basado en los módulos granulométricos ya que es más exacto que el método por tanteos. En este caso, en primer lugar se calculó el tanto por ciento en volumen que representa cada fracción granulométrica utilizada respecto del total (100 %) tomando como valor máximo los 20 mm de diámetro del árido como se explicó anteriormente con la fórmula de la ecuación de Fuller. Una vez obtenido cuánto representa cada huso granulométrico, se determinó el porcentaje de dosis a aplicar para cada fracción siendo este la diferencia entre el 100 % (20 mm) y el porcentaje anteriormente calculado de la siguiente fracción (16 mm) y así sucesivamente para cada una de ellas.

Una vez conocida la relación A/C, el contenido de agua a aplicar y obtenida la cantidad de cemento, podemos conocer el volumen de árido por diferencia, teniendo en cuenta que la mezcla de los materiales (cemento, agua y áridos) representará 1025 l como se indicó anteriormente. Con este valor y sabiendo el porcentaje de mezcla a aplicar anteriormente hallado, se puede obtener el volumen de cada fracción de árido.

Finalmente, conociendo la densidad aparente de la grava, gravilla y arena determinada en apartados anteriores, podemos pasar de tener el volumen de cada fracción al peso por metro cúbico y, como no se elaboró tanta cantidad, se determina el volumen final a realizar para obtener dicho valor respecto al volumen deseado.

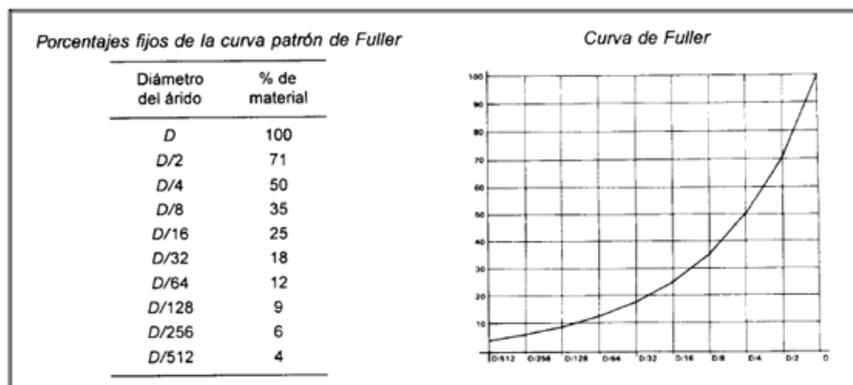


Figura 16: Porcentajes y curva patrón según el método de Fuller

Fuente: Fernández Cánovas (2011)

3.3.3.- Método de Bolomey

Este método se considera un perfeccionamiento del método de Fuller, por lo que la forma de realizar los cálculos es bastante similar. Respecto a para qué características es indicado emplear este método se ajustan de mejor forma al presente estudio que en el caso anterior, ya que es útil para el diseño de hormigones en masa donde conocemos la cantidad de cemento a emplear, el tipo, la granulometría y el tamaño máximo del árido, además de saber el sistema de compactación. Es importante indicar que es un método que busca obtener el hormigón más económico, con menor cantidad de cemento ya que lo incorpora como un árido más, aunque no el más resistente.

La curva granulométrica de referencia viene definida por la siguiente ecuación:

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

Siendo:

y : porcentaje en volumen que pasa por cada tamiz de abertura d .

d : abertura del tamiz en cuestión en mm.

D : tamaño máximo del árido en mm.

a : parámetro que viene indicado su valor en la tabla 13.

Tabla 13: Valores de a en función del tipo de árido y la consistencia del hormigón

Tipo de árido	Consistencia del hormigón	Valores de a
Rodado	Seco - plástica	10
	Blanda	11
	Fluida	12
Machacado	Seco - plástica	12
	Blanda	13
	Fluida	14

Fuente: Fernández Cánovas (2011)

Como se pretende obtener un hormigón con consistencia blanda tanto para la amasada de hormigón natural como para la de hormigón reciclado, para el primer caso se cogió un valor para a de 11, mientras que para el reciclado se tomó 13 como se indica en la tabla anterior.

En este método además, hubo una diferencia a la hora de tomar las distintas fracciones granulométricas de los áridos debido a que, tras realizar la amasada para la

obtención del hormigón reciclado, no se obtenía la cantidad de arena necesaria tras el tamizado, por lo que este problema se solventó realizando la dosificación teniendo en cuenta las granulometrías establecidas por la empresa Reutiliza S.L. para cada saca de material proporcionado divididas en grava, gravilla y arena. Es decir, en vez de tomar una determinada cantidad de cada huso granulométrico, se hicieron los cálculos para poder obtener los kilos totales de grava, gravilla y arena sin un tamizado previo.

El tamaño máximo de árido es el correspondiente al tamiz más pequeño de la serie, que retenga menos del 15 % o que deje pasar más del 85 %. Sin embargo, a efectos prácticos y a fin de evitar tanteos, se considera que el tamaño máximo de árido es el que corresponde al 25 % en vez del 15 % citado anteriormente, por lo que al igual que en el método de Fuller, se identificó a este valor los 20 mm de diámetro.

La cantidad de agua a emplear para la elaboración del hormigón reciclado, se obtuvo de la tabla 10 para un diámetro máximo de 20 mm y para árido machacado, es decir, 202 l/m³. Mientras que para el hormigón natural, se decidió tomar el valor establecido por la tabla 14 para, además de intentar conseguir una consistencia mejor que la obtenida por el método de Fuller, ajustarse mejor a las características de cada tipo de árido empleado en vez de escoger un valor común para ambos ya que, como se indicó anteriormente, la geometría y el tipo de árido puede influir en la absorción de agua y por lo tanto en los datos obtenidos. Esta tabla está constituida para emplearse para el cálculo de la cantidad de agua por el método de La Peña, pero puede ser muy útil aplicar esos valores tanto para este método como para el de Fuller, por lo que, para árido rodado con un diámetro máximo de 20 mm y consistencia blanda se utilizó el valor de 205 l/m³.

Tabla 14: Determinación del agua de amasado

Consistencia del hormigón	Árido de canto rodado			Árido de machaqueo		
	80 mm	40 mm	20 mm	80 mm	40 mm	20 mm
Seca	135	155	175	155	175	195
Plástica	150	170	190	170	190	210
Blanda	165	185	205	185	205	225
Fluida	180	200	220	200	220	240
Líquida	195	215	235	215	235	255

Fuente: Fernández Cánovas (2011)

El proceso de cálculo para el hormigón reciclado fue por lo tanto, igual al método de Fuller con la diferencia de que al calcular el porcentaje de volumen de cada fracción, se empleó la fórmula establecida para este método.

Para el árido convencional varió la forma de cálculo, ya que lo que se quiere obtener son los kilos totales de cada una de las sacas anteriormente nombradas, es decir, el porcentaje final de mezcla a aplicar. El proceso que se llevó a cabo fue el siguiente:

En primer lugar se determinó el valor de y (con la fórmula anteriormente establecida) para cada fracción y el porcentaje que pasa de cada una de ellas por el tamiz diferenciando los husos que formaban parte de la grava, de la gravilla, de la arena y por último los del cemento el cual, debido a su finura, pasarán por todas las fracciones.

Después se definió el modulo granulométrico de las tres partes en las que se ha dividido esta dosificación anteriormente citadas, teniendo en cuenta el número de fracciones para este caso y restándole la suma del contenido que pasa por el tamiz en total entre 100; en el caso del cemento (t_0), tras obtener su contenido gracias a la relación agua/cemento establecida (0,55) y la cantidad de agua, dividiremos dicho valor entre su densidad y a su vez, se dividirá el valor obtenido entre la diferencia del contenido total de componentes (1025 l) menos el contenido en agua establecido para este caso (205 l/m³), todo ello por cien para obtener un porcentaje. Hay que tener en cuenta que hay que obtener también los módulos granulométricos de las curvas de Bolomey, que no son correspondientes para cada tamaño máximo de la fracción de árido considerado sino los modificados para este caso.

Una vez establecidos dichos valores, ya podemos determinar el porcentaje de volumen para cada una de las tres partes establecidas, para ello se tiene que aplicar las siguientes fórmulas sabiendo que t_0 será el porcentaje de cemento que entra en la composición del hormigón calculado anteriormente, t_1 el de la arena, t_2 el de la gravilla y t_3 el de la grava; m el módulo granulométrico y mt el módulo granulométrico modificado según la curva de Bolomey, siguiendo la denominación establecida anteriormente.

$$t_0 + t_1 + t_2 = 100 \frac{m_3 - mt_3}{m_3 - mt_2}$$

$$t_1 = \frac{(t_0 + t_1 + t_2)(m_2 - mt_2) - t_0 m_2}{m_2 - m_1}$$

$$t3 = 100 - (t0 + t1 + t2)$$

$$t2 = (t0 + t1 + t2) - (t0 - t1)$$

Finalmente podemos conocer el volumen de cada componente de áridos y cemento con el porcentaje de cada uno de ellos, teniendo en cuenta que lo que queda a repartir estará establecido por la diferencia del total (1025 l) menos el contenido de agua, pudiendo posteriormente pasar este valor a masa (debido a que conocemos la densidad) y tras esto, corregir los contenidos al volumen de hormigón que en este caso vayamos a elaborar.

3.3.4.- Método de La Peña

Este método de dosificación por resistencias es muy empleado en España y se aplica para elementos estructurales de varios tipos considerando las condiciones de ejecución de estos como buenas.

En este método además, se parte de las resistencias medias que ha de tener el hormigón que en este caso serán 25 MPa para determinar la relación agua/cemento con la siguiente fórmula:

$$Z = K * f_{cm} + 0,5$$

en la que:

Z: relación agua/cemento.

f_{cm} : resistencia media del hormigón.

K: es un parámetro que toma los valores dados en la tabla 15, cuando la resistencia está expresada en N/mm².

Tabla 15: Valores de K dependiendo de la clase de cemento y el tipo de árido

Clase de cemento	Áridos rodados	Áridos machacados
32,5	0,054	0,035
42,5	0,045	0,030
52,5	0,038	0,026

Fuente: Fernández Cánovas (2011)

Para este caso el cemento empleado presenta una resistencia de 42,5 N por lo que se tomó para la elaboración del hormigón natural el valor de 0,045 y para el hormigón reciclado 0,03 como viene establecido en la tabla anterior.

En los otros métodos la relación agua/cemento se fijó en 0,55, pero en este debido a que se calcula según la fórmula anterior, no se ha podido emplear dicho valor en el caso del hormigón natural, aunque se ha intentado ajustar lo máximo posible (0,48) aumentando en este caso el valor medio de resistencia a 31,5 MPa.

El contenido en agua se establecerá de igual forma al método de Bolomey teniendo en cuenta la consistencia y los valores establecidos en la tabla 14, siendo en este caso para el hormigón convencional 205 l/m³ y para el hormigón reciclado, debido a que siguiendo las pautas establecidas en otras elaboraciones no se conseguía la consistencia deseada sino más bien seca, se ha optado por coger un valor de 230 l/m³ para que, aunque nos encontremos dentro de una consistencia entre blanda y fluida, aumentemos la cantidad de agua para observar si se obtienen mejores resultados y para poder ajustarnos a una resistencia media de 25 MPa y una relación agua/cemento 0,55.

Ya se podría obtener el peso del cemento ya que conocemos el valor de Z y el volumen de agua por medio de una multiplicación. Es importante establecer que se partirá de una cantidad inicial de cemento de 300 kg/m³, realizando posteriormente las correcciones necesarias modificando la proporción de arena. Hay que comprobar además que el valor obtenido se encuentra dentro de los límites establecidos en la EHE-08, el mínimo según clase de exposición determinado anteriormente y el valor máximo establecido en 500 kg/m³, en caso de no cumplir por exceso, se aumentaría la f_{cm} y se repetiría el procedimiento.

A la hora de obtener el volumen de áridos para la mezcla, se pueden calcular por dos métodos: mediante un ábaco al cual se entra por medio del módulo granulométrico de la arena y el tamaño máximo de árido en milímetros propuesto por Fernández Cánovas; o empleando los módulos granulométricos propuestos por Bernardo Llamas que será el utilizado en este caso.

Con este método lo que se pretende es ajustar la granulometría a la parábola de Fuller mediante el módulo granulométrico de cada árido y el correspondiente al de Fuller. Los cálculos para la determinación de cada módulo granulométrico se llevaron a cabo siguiendo las fórmulas establecidas por el método de Bolomey, ya que se optó por seguir cogiendo los áridos sin un tamizado previo, sino por sacas teniendo en cuenta la dosificación dada por la empresa. Hay que tener en cuenta que en este método el cemento no entra a formar parte de la granulometría de los áridos y por lo tanto, no tendrá valor de módulo granulométrico.

Además tras obtener los valores de los volúmenes y las masas, este método propone una serie de correcciones a tener en cuenta. En este estudio las correcciones que se han tomado han sido:

- Corrección en la arena por exceso o defecto de cemento, ya que el método como se explicó anteriormente, está diseñado para hormigones con una dosificación de 300 kg/m^3 , por lo que cualquier variación en la cifra debe tenerse en cuenta. Para este caso como existía un exceso de cemento se disminuyó el contenido de arena.
- El hormigón se compactó por vibración, por lo que se tuvo que aumentar el árido más grueso (englobado en la fracción grava) en un 4 %, restando este aumento al resto de áridos proporcionalmente a su porcentaje.
- Por último, para la elaboración del hormigón reciclado se empleó árido machacado teniendo que aplicarse en este caso también una corrección, la cual consistió en aumentar el contenido de arena en un 4 %, restándose de las demás de la forma antes indicada.

3.3.5.- Método de Faury

Este método introduce una serie de mejoras muy importantes respecto a los otros métodos que toman como dato de partida la cantidad de cemento, además se considera que puede ser aplicable para todo tipo de hormigones.

En este caso tomamos como referencia la dosificación elaborada por Julia García en su tesis (García González, 2016), ajustando a las distintas fracciones granulométricas determinadas en este caso, ya que para estas dosificaciones no se tomaron los volúmenes totales de grava, gravilla y arena como en los casos anteriores. Además en dos de las amasadas realizadas se aplicó aditivo superplastificante anteriormente especificado.

Se sigue un procedimiento distinto a los otros métodos ya que incorpora muchos parámetros nuevos que tiene en cuenta a la hora de calcular la dosificación. Los pasos a seguir serán los siguientes:

- Determinar el tamaño máximo del árido.
- Calcular el radio medio.
- Determinar el volumen de huecos.
- Contenido de agua en la mezcla.

- Hallar la proporción de cemento respecto a los demás sólidos.
- Determinar la resistencia y la relación A/C.
- Calcular la ordenada $P_{d/2}$.
- Hallar la proporción de los agregados ajustados a la curva.

Para la determinación del tamaño máximo de árido se utiliza la siguiente fórmula:

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

siendo:

D : tamaño máximo de árido de Faury; no coincide con el de la curva granulométrica.

d_1 : es el primer tamiz en el que queda retenido algún agregado grueso.

x : es la cantidad retenida en porcentaje en peso en d_1 .

d_2 : es el siguiente tamiz de la serie; normalmente $d_2 = d_1/2$.

y : es la cantidad retenida entre d_1 y d_2 .

El cálculo del radio medio es una relación entre el volumen y la superficie del molde. Cuando se trata de un prefabricado, este valor se calculará considerando el encofrado y las armaduras, pero en este caso en el que se va a realizar una dosificación genérica en probetas de laboratorio, se pueden considerar las dimensiones del molde donde se va a confinar la probeta para su rotura, en este caso se realizó un volumen pequeño de amasada debido a que las probetas empleadas para los ensayos fueron las de 100x200 mm.

El volumen de huecos puede calcularse con una fórmula dada en diversas fuentes (Fernández Cánovas, 2011), pero en este caso se decidió realizar el cálculo por medio de una tabla que sirve de estimación proporcionada por el Instituto Americano del Hormigón (ACI), interpolando en la tabla siguiente para el máximo diámetro de árido calculado inicialmente.

Tabla 16: Volumen de poros en el hormigón según diámetro máximo. Método A.C.I.

Máxima dimensión del árido (D) [mm]	Volumen de poros (V _v) [l/m ³ de hormigón]
9,5	30
12,7	25
19,1	20
25,4	15
38,1	10
50,8	5
76,2	3
152,4	2

Fuente: 318-14: Building Code Requirements for Structural Concrete

También hay que determinar el índice de poros para posteriormente, obtener el agua de amasado final por diferencia entre este valor y el volumen de poros anteriormente estimado. Para ello se aplica la siguiente fórmula donde ya conocemos todos los parámetros que en ella se encuentran a excepción del valor K y K' , los cuales se determinarán teniendo en cuenta que se busca una consistencia blanda y que en este caso solo se realizará hormigón reciclado con sustitución del árido grueso, obteniendo los valores establecidos por lo tanto en la tabla siguiente.

$$I_V = \frac{K}{\sqrt[5]{D_{max}}} + \frac{K'}{\frac{R}{D_{max}} - 0,75}$$

Tabla 17: Valores de K y K'

Puesta en Obra	Valores de K			Valores K'
	Arenas y gravas rodadas	Arenas rodadas y árido grueso de machaqueo	Árido fino y grueso de machaqueo	
Consistencia muy fluida, puesta en obra sin compactar	$\geq 0,370$	$\geq 0,405$	$\geq 0,405$	0,002
Consistencia blanda, compactación media	0,350-0,370	0,375-0,405	0,430-0,460	0,003
Consistencia seco plástica, compactación muy cuidada	0,333-0,350	0,355-0,385	0,400-0,430	0,003
Consistencia tierra húmeda, compactación muy potente	0,250-0,333	0,330-0,350	0,350-0,370	0,003
Compactación excepcionalmente potente	$\leq 0,250$	$\leq 0,330$	$\leq 0,350$	0,004

Fuente: Fernández Cánovas (2011) con datos de K' de García González (2016)

La relación agua/cemento en este caso se disminuyó a 0,4 cuando se aplicó el aditivo ya que, como se determinó en apartados anteriores, el objetivo del superplastificante es disminuir la cantidad de agua, por lo que no sería necesaria una relación tan alta como la aplicada en métodos anteriores en un principio. En el caso de no utilizar el aditivo, se aumentó la relación a 0,5. El hormigón de limpieza elaborado por este mismo método se realizó sin la aplicación de aditivo y con una relación agua/cemento 0,74 ya que no viene limitada por norma.

Una vez conocida la cantidad de agua y la relación agua/cemento se puede determinar el contenido de cemento a emplear en cada caso. También se puede obtener el volumen (V_c) de cemento teniendo en cuenta su densidad.

El volumen de partículas sólidas (V_s) equivale al volumen ocupado por los áridos y el cemento, que se puede determinar con la siguiente ecuación ya que conocemos el valor del índice de poros.

$$V_s = 1 - I_v$$

Una vez establecidos estos dos valores anteriores podemos determinar el porcentaje de cemento relativo al volumen de sólidos totales calculándolo con la siguiente ecuación.

$$C_{\%} = \frac{V_C}{V_S} \times 100$$

La curva de referencia para el método es la representada a continuación, con ella podemos determinar la cantidad ponderada de cada una de las fracciones granulométricas que deben formar parte del hormigón, para la cual es necesario conocer su punto inicial, intermedio y final.

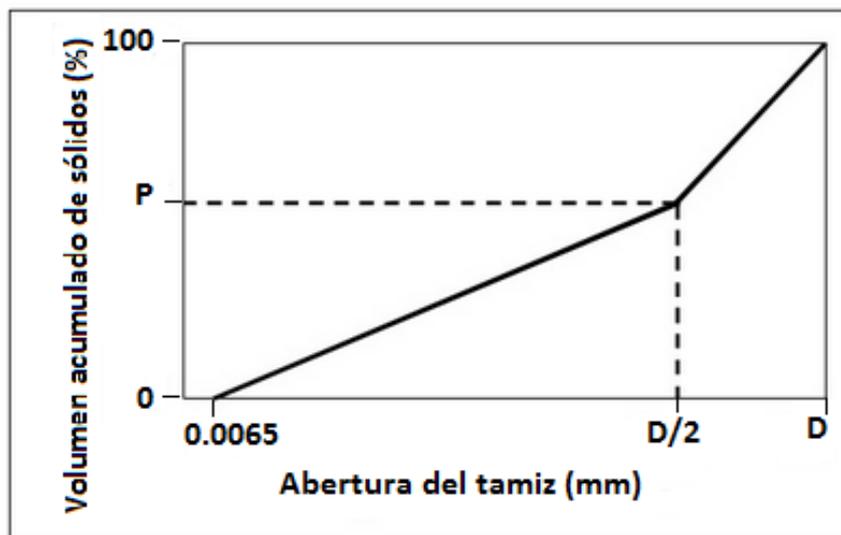


Figura 17: Curva de referencia de Faury

Fuente: Fernández Cánovas (2011)

Para determinar el valor de $P_{D/2}$ se aplica la siguiente fórmula:

$$P_{D/2} = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75}$$

A y B que son los únicos parámetros desconocidos, dependen de la naturaleza del árido, de la trabajabilidad y de los medios de colocación utilizados. En este caso para consistencia blanda y arena rodada y árido grueso de machaqueo se utilizó $A = 30$ y $B = 2$.

Tabla 18: Valores de A y B para método de Faury

Puesta en Obra	Valores de A			Valores B
	Arenas y gravas rodadas	Arenas rodadas y árido grueso de machaqueo	Árido fino y grueso de machaqueo	
Consistencia muy fluida, puesta en obra sin compactar	32	34	38	2
Consistencia blanda, compactación media	28	30	32	2
Consistencia seca, compactación potente	20-21	21-22	22-23	1-1,5
Consistencia tierra húmeda, compactación muy potente	≤ 18	≤ 19	≤ 20	1
Compactación plástica, vibración media	21-22	23-24	25-26	1,5

Fuente: Fernández Cánovas (2007)

Una vez encontrada la curva de referencia, a partir de ahí se puede ir determinando las proporciones de cada huso granulométrico para ajustar la curva a nuestras fracciones establecidas.

En un primer momento se observó que la curva obtenida tras los cálculos, presentaba unas irregularidades en su forma no justificadas que se eliminaron reajustando las cantidades de cada fracción para que la curva fuese más recta y por lo tanto, más parecida a la de referencia.

Posteriormente, tras los resultados obtenidos, se optó por elaborar la amasada con la dosificación obtenida en un inicio sin realizar las modificaciones antes establecidas.

Finalmente, se elaboró una amasada donde se eliminó el aditivo para realizar una comparación de la aplicación de este componente, como se adelantó previamente, se aumentó en este caso la relación agua/cemento debido a que el aditivo reduce la necesidad de agua en la amasada, además se decidió reducir la cantidad de árido más grande a aplicar, añadiendo lo sobrante a la fracción de 4 mm para comprobar si el aditivo podría haber producido una segregación de los áridos gruesos como marcaba la

etiqueta del producto en las contraindicaciones. También se elaboró con esta dosificación el hormigón de limpieza, para el cual se siguieron los mismos parámetros que en el anterior caso diferenciándose en la relación agua/cemento.

3.4.- Ensayo sobre hormigón fresco: consistencia

La consistencia del hormigón fresco es el grado de deformación que este presenta y como consecuencia de esta propiedad, se verá influenciada la capacidad de ocupar los huecos del encofrado o molde donde se vierte. Este parámetro está influenciado por diversos factores como son la granulometría, al agua empleada para el amasado, el tamaño máximo de árido y sobre todo estará afectado por la aplicación de árido reciclado en la amasada, ya que este produce consistencias más secas en general y por tanto menos trabajables.

La consistencia se ha medido mediante un método conocido como "cono de Abrams" llevado a cabo según la norma UNE-EN 12350-2, y se ha escogido este por ser un ensayo muy sencillo que proporciona resultados satisfactorios y que no requiere de un equipo muy costoso ni personal especializado. El modo de realizar este ensayo es el siguiente: el molde se humedece o aplica un poco de desencofrante para evitar que la masa de hormigón fresca quede adherida a las paredes del cono y para evitar el rozamiento, después se coloca sobre una bandeja metálica en una superficie completamente horizontal, donde se introduce la masa en el interior del cono en tres facciones de más o menos el mismo volumen hasta completar el molde, y cada vez que se aplique una de las capas, se realizará una compactación con una barra de acero dando 25 golpes. Una vez lleno el molde se enrasa la cara superior y este se va elevando con precaución para posteriormente medir el asentamiento experimentado por la cara superior del mismo como se puede observar en la figura 18.



Figura 18: Ejemplo de medición de consistencia con el cono de Abrams

Fuente: Elaboración propia

3.5.- Ensayo sobre hormigón endurecido: compresión

3.5.1.- Fabricación del hormigón

En primer lugar se lleva a cabo la amasada para mezclar todos los elementos y que la pasta de cemento recubra todos los áridos. Para este proceso se empleó una hormigonera de eje vertical, ya que era la disponible en el laboratorio donde se llevaron a cabo los ensayos (figura 19). Como ventaja presenta la capacidad de suministrar hormigones homogéneos, además de poder vigilar como se está llevando a cabo el mezclado pudiendo incluso realizar las correcciones que se estime precisas, como desventaja se podría destacar la lenta velocidad de descarga pudiendo producir hormigones segregados cuando se emplean áridos grandes.

A la hora de añadir cada elemento para constituir finalmente el hormigón e intentando seguir una amasada igual para todos los métodos y en las mejores condiciones, se realizó de la siguiente manera: primero los finos a la vez que la mitad del cemento para que fuera incorporándose de manera homogénea a la mezcla, posteriormente de menor a mayor tamaño los áridos grandes introduciendo a su vez la mitad del agua para que se fueran humedeciendo y finalmente, tras haber aplicado todos los áridos a la mezcla, el resto de agua y cemento hasta acabar su contenido total para la formación de la pasta final.

Para elaborar las probetas de hormigón se emplearon para todas las pruebas moldes cilíndricos de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura (figura 20). A pesar de

no ser las recomendadas por normativa, se decidió elegir este tipo por los motivos siguientes:

- Mayor facilidad de fabricación en cuanto al llenado se refiere, ya que al ser moldes que requieren menos volumen de hormigón la incorporación de la mezcla será más rápida.
- Mayor facilidad en el manejo, ya que las probetas de hormigón seleccionadas pesan 3,6 kg aproximadamente frente a los 12,2 kg de las recomendadas por norma siendo más sencillo moverlas, introducirlas y sacarlas del agua de curado y refrentarlas.
- Requieren menor volumen de almacenamiento, especialmente en el tanque de curado, ocupando tres veces menos de volumen que las recomendadas por norma.
- Menor peso y por lo tanto mayor ergonomía.
- Se requiere menor volumen de hormigón para elaborar el mismo número de probetas que en el caso de que fueran de mayor tamaño.

Aun así para los métodos de Fuller, Bolomey y de La Peña se realizó una probeta de 150 x 300 mm para observar los resultados obtenidos.

Para la fabricación sí se siguieron las recomendaciones de la norma UNE-EN 12360-2. Se empleó en primer lugar un desencofrante estándar para evitar la adherencia del hormigón a las paredes del molde y se fue llenando con la masa de hormigón por tres capas de volumen similar, compactando cada capa con un vibrador de aguja (figura 19). Una vez llenos los moldes se enrasaron con una llana y se cubrieron con film transparente para evitar que se produjese desecación dejándolos durante aproximadamente un día. Transcurrido ese tiempo se desencofraron y se marcó cada probeta para mantenerlas siempre localizadas y no perder o confundir ninguna y se mantuvieron en agua de curado por inmersión durante 28 días para finalmente realizar el ensayo de rotura a compresión.



Figura 19: Hormigonera de eje vertical (izq) y vibrador de aguja (dcha)

Fuente: Elaboración propia



Figura 20: Probetas de 100x200 mm

Fuente: Elaboración propia

3.5.2.- Ensayo de rotura a compresión

La compresión es la característica más representativa del hormigón siendo por lo tanto, el parámetro más empleado en los distintos estudios para medir la capacidad y la calidad de este. Fue esta una de las motivaciones de realizar este ensayo además de para poder llevar a cabo las comparaciones pertinentes entre las distintas amasadas ya que, en el caso del hormigón reciclado, uno de los factores que hace que sea limitado su uso es la falta de confianza respecto a la calidad, es decir, a la resistencia que finalmente aportará el material. Es cierto que de forma general en experimentos anteriores se ha determinado que a medida que se va aumentando la sustitución del árido convencional

por el reciclado se produce una disminución de la resistencia final del hormigón (García González, 2016). Pero en otros casos, sustituyendo los áridos gruesos por reciclados y manteniendo la parte de finos con áridos naturales (como en el presente estudio), se han obtenido datos muy similares en cuanto a la resistencia comparándola con hormigones totalmente naturales (González-Fonteboa, 2005). Por lo tanto, como la resistencia del hormigón reciclado se ve comprometida e influenciada por tanto parámetros y es diferente en unos casos que en otros, es importante establecer el valor de esta para determinar la calidad y para adquirir un parámetro de comparación entre las distintas amasadas.

Como se adelantó anteriormente, el ensayo se realizó a los 28 días de ser elaboradas las probetas y mantenerlas durante ese periodo inmersas en agua para su curado. Tras esto, se dejaban secar durante unas horas para que perdieran el agua que habían absorbido y después, se refrentaba la parte superior de la probetas con una mezcla caliente de azufre para evitar desigualdades en la superficie y que no se viera comprometida la resistencia. La máquina empleada para el ensayo se trata de una prensa hidráulica que ejerce compresión mediante dos platos a la probeta, conectada a un ordenador para que, en el momento que se detecte rotura o fisura del hormigón, se pare el ensayo y aparezcan los datos resultantes en la pantalla.



Figura 21: Equipo empleado para ensayo de rotura a compresión

Fuente: Elaboración propia



Figura 22: Probeta antes y después del ensayo de rotura a compresión

Fuente: Elaboración propia

Para la comparación de los resultados se realizó la media (f_{cm}) de todas las resistencias obtenidas, pero este valor no da un índice de la verdadera calidad del hormigón al no tener en cuenta la dispersión de los datos. A fin de evitar este problema y adoptar un coeficiente de seguridad único, se calcularon los datos de la resistencia característica (f_{ck}), la cual tiene en cuenta tanto la media de los datos obtenidos como el coeficiente de variación (δ). Así las resistencias características obtenidas representan un grado de confianza del 95 %, con lo que solo hay un 5 % de probabilidades de presentar valores más bajos de los establecidos.

La expresión para los cálculos anteriores sería la siguiente:

$$f_{ck} = f_{cm} (1 - 1,64 \delta)$$

Para el coeficiente de variación la expresión sería:

$$\delta = \frac{\sigma}{f_{cm}}$$

Siendo σ la desviación estándar del conjunto de datos.

También se tendrá en cuenta cómo es la uniformidad de los datos de acuerdo a la Instrucción española de hormigón en función de la variación de los resultados de la rotura de las probetas del mismo estableciendo que la calidad es:

- Excelente para $\delta = 10 \%$.
- Media para $\delta = 15 \%$.
- Regular para $\delta = 20 \%$.

Por último hay que tener en cuenta que los datos que corresponderán con un buen resultado de dicho ensayo, serán aquellos que presenten una resistencia característica mayor o igual a 25 MPa, ya que es la resistencia mínima exigida para los hormigones estructurales.

4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de haber realizado todos los cálculos anteriormente determinados y llevar a cabo la elaboración del hormigón en el laboratorio, se muestra a continuación los resultados obtenidos divididos en los tres objetivos iniciales que se pretenden buscar con el presente estudio.

4.1.- Resultados hormigón natural vs reciclado

Como ya se ha visto anteriormente y después de todos los datos recopilados, se puede decir que en general el hormigón natural no presenta la misma forma de comportarse que el hormigón reciclado, por ello lo que se pretende con este estudio es realizar una comparación de las amasadas obtenidas para ambos casos.

Los métodos de dosificación empleados para dicha comparación han sido los métodos de Fuller, Bolomey y de La Peña, elaborados de la forma más homogénea posibles pero, inevitablemente presentado algunas diferencias:

- Tanto para el hormigón natural como para el reciclado en el **método de Fuller** se empleó la misma dosificación.
- En el **método de Bolomey** se elaboró la amasada de reciclado con las distintas fracciones granulométricas previamente tamizadas, mientras que para el natural se determinó las proporciones a emplear con la granulometría de la empresa Reutiliza S.L. divididas en grava, gravilla y arena cogiendo directamente el material de las tres sacas sin un tamizado previo.
- Los dos **métodos de La Peña** se realizaron de igual forma que Bolomey pero para el natural no se pudo mantener la relación agua/cemento en los cálculos.

En este apartado se representará los datos obtenidos de la dosificación para la elaboración del hormigón en masa calculado para cada método al igual que sus curvas granulométricas y los datos iniciales importantes empleados para el cálculo de alguno de los valores establecidos.

Las comparaciones se llevarán a cabo por medio de las consistencias obtenidas y los valores de los ensayos de rotura a compresión representados al final con las observaciones y discusiones oportunas.

○ MÉTODO DE FULLER HORMIGÓN NATURAL Y RECICLADO

Tabla 19: Dosificación hormigón natural y reciclado por Fuller

Tamiz mm	Fuller	Dosis %	Volumen (L/m ³)	Peso/m ³	0,023 m ³
20	100,0	0	0,0 L	0,0 kg	0,00
16	89,4	10,6	73,0 L	185,5 kg	4,267 kg
12,5	79,1	10,4	71,9 L	182,5 kg	4,198 kg
8	63,2	15,8	109,4 L	277,8 kg	6,390 kg
6,3	56,1	7,1	49,3 L	124,1 kg	2,855 kg
4	44,7	11,4	78,9 L	198,8 kg	4,573 kg
2	31,6	13,1	90,6 L	226,6 kg	5,211 kg
1	22,4	9,3	64,1 L	160,2 kg	3,684 kg
0,63	17,7	4,6	31,9 L	79,8 kg	1,835 kg
0,25	11,2	6,6	45,4 L	113,6 kg	2,613 kg
0,16	8,9	2,2	15,5 L	38,7 kg	0,890 kg
0,08		8,9	61,9 L	154,7 kg	3,558 kg
Suma:			691,8 L	1742,3 kg	40,073 kg

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20: Datos de referencia para el método de Fuller

Datos	volumen	masa	0,023 m ³
Agua	210 L	210 kg	4,830 kg
Cemento	123,2 L	381,8 kg	8,782 kg
Áridos	691,8 L	1742,3 kg	40,073 kg
suma		2334 kg/m ³	54 kg/m ³

Fuente: Elaboración propia

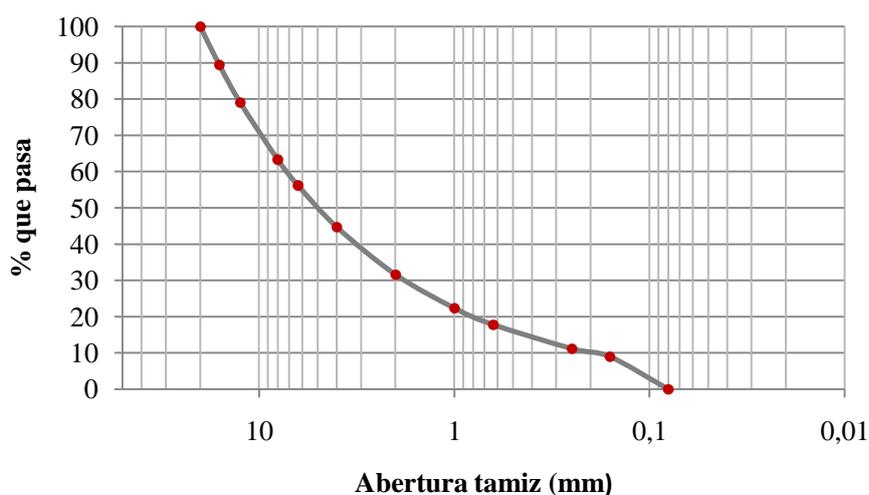


Figura 23: Curva granulométrica de Fuller para hormigón reciclado y natural

Fuente: Elaboración propia

○ MÉTODO DE BOLOMEY HORMIGÓN RECICLADO

Tabla 21: Dosificación hormigón reciclado por Bolomey

	a = 13				
Tamiz mm	Bolomey	Dosis %	Volumen (L/m³)	Peso/m³	0,021 m³
20	100,0	0	0,0 L	0,0 kg	0,00
16	90,82	9	75,6 L	193,5 kg	4,107 kg
12,5	81,78	9,0	74,4 L	190,4 kg	4,041 kg
8	68,02	13,8	113,2 L	289,8 kg	6,152 kg
6,3	61,83	6,2	51,0 L	130,5 kg	2,770 kg
4	51,91	9,9	81,7 L	209,0 kg	4,437 kg
2	40,51	11,4	93,8 L	234,5 kg	4,977 kg
1	32,45	8,1	66,3 L	165,8 kg	3,519 kg
0,63	28,44	4,0	33,0 L	82,6 kg	1,752 kg
0,25	22,73	5,7	47,0 L	117,6 kg	2,495 kg
0,16	20,78	1,9	16,0 L	40,0 kg	0,850 kg
0,08	18,50	2,3	18,8 L	46,9 kg	0,995 kg
< 0,08	0	4,1	33,8 L	84,5 kg	1,794 kg
Cemento		14,4	118,5 L	367,3 kg	7,796 kg
Suma			823 L	2152 kg/m ³	45,684 kg

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22: Datos referencia Bolomey reciclado

Datos	volumen	masa	0,021 m³
Agua	202 L	202 kg	4,288 kg
Cemento	118 L	367 kg	7,796 kg
Cem + agua	823 L		
Áridos	705 L	1785 kg	37,889 kg
suma		2354 kg/m ³	50 kg/m ³

Fuente: Elaboración propia

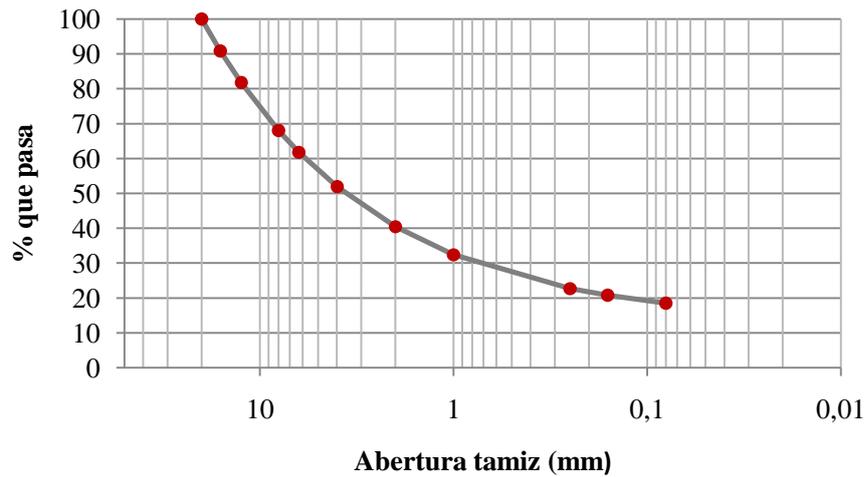


Figura 24: Curva granulométrica Bolomey reciclado

Fuente: Elaboración propia

○ MÉTODO DE BOLOMEY HORMIGÓN NATURAL

Tabla 23: Porcentaje que pasa y proporción de arena, gravilla y grava por Bolomey

Tamiz (mm)	a = 11					
	Bolomey	Arena	Gravilla	Grava	Cemento	Mezcla
	Proporción=	18,9	38,2	28,2	14,6	100,0
31,5	100,0	100	100	100	100	100,0
16	74,4	100	100	30,7	100	80,4
8	55,9	100	48,6	0,9	100	52,4
4	42,7	94	0,5	0,9	100	32,9
2	33,4	85,1	0,3	0,9	100	31,1
1	26,9	80	0,3	0,9	100	30,1
0,5	22,2	67,6	0,3	0,9	100	27,8
0,25	18,9	27,5	0,2	0,9	100	20,2
0,125	16,6	6,2	0,2	0,9	100	16,1
MG:	5,09	2,396	6,496	7,63	0	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24: Ajuste por módulos granulométricos (Bolomey)

Áridos	Tamices	MG árido	MGB	% buscado	% en volumen
Grava	31,5	7,63	5,09	t_3	28,2
Ar. Gruesa	16	6,496	4,09	t_2	38,2
Arena	4	2,396	2,24	t_1	18,9
Cemento		0		t_0	14,63

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25: Dosificación Bolomey natural

Áridos	Volumen	Masa	Hormigonera
Arena	155,2 L	388,0 L	8,235 kg
Gravilla	313,2 L	789,3 L	16,754 kg
Grava	231,6 L	592,9 L	12,584 kg
Cemento	120,0 L	372,0 L	7,896 kg
Agua	205,0 L	205,0 L	4,351 kg

Fuente: Elaboración propia

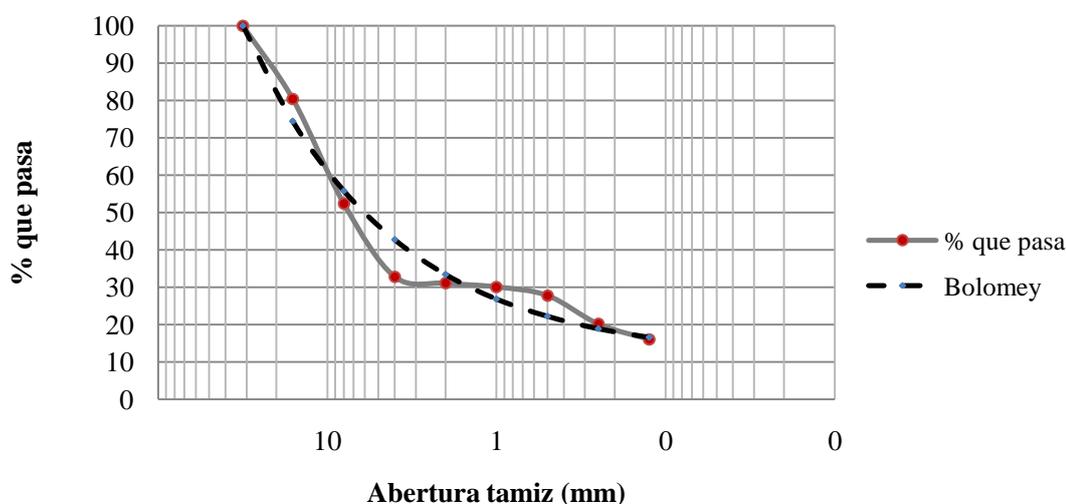


Figura 25: Curva granulométrica Bolomey natural

Fuente: Elaboración propia

○ MÉTODO DE LA PEÑA HORMIGÓN RECICLADO

Tabla 26: Porcentaje que pasa y proporción de arena, grava y gravilla por La Peña

Tamiz (mm)	Fuller	Arena	Gravilla	Grava	Mezcla
	Proporción=	21,9	41,1	36,9	100
31,5	100	100	100	100	100
16	71,3	100	100	64	86,7
8	50,4	100	77	1	54
4	35,6	94	14	1	26,7
2	25,2	85,1	1	1	19,4
1	17,8	80	0	1	17,9
0,5	12,6	67,6	0	1	15,2
0,25	8,9	27,5	0	1	6,4
0,125	6,3	6,2	0	1	1,7
MG:	5,72	2,396	6,08	7,29	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 27: Ajustes por módulos granulométricos (La Peña reciclado)

Áridos	Tamices	MG árido	MGB	% buscado	% en volumen
Grava	31,5	7,29	5,72	t3	36,9
Gravilla	16	6,08	4,80	t2	41,1
Arena	4	2,396	3,01	t1	21,9

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28: Correcciones y dosificación final de La Peña natural

Mezcla	V (L)	exceso cemento	vibrado	Áridos machacado	Volumen corregido	Masa	hormigonera
Grava	257,8		10,3	-2,2	244,33	626 kg	13,277 kg
Gravilla	287,3		-7,4	2,4	280,19	706 kg	14,987 kg
Arena	153,1	-38,3	-2,9	4,6	157,5	394 kg	8,358 kg
Cemento	96,8	38,3			137,96	428 kg	9,078 kg
Agua	230				205	205 kg	4,351 kg

Fuente: Elaboración propia

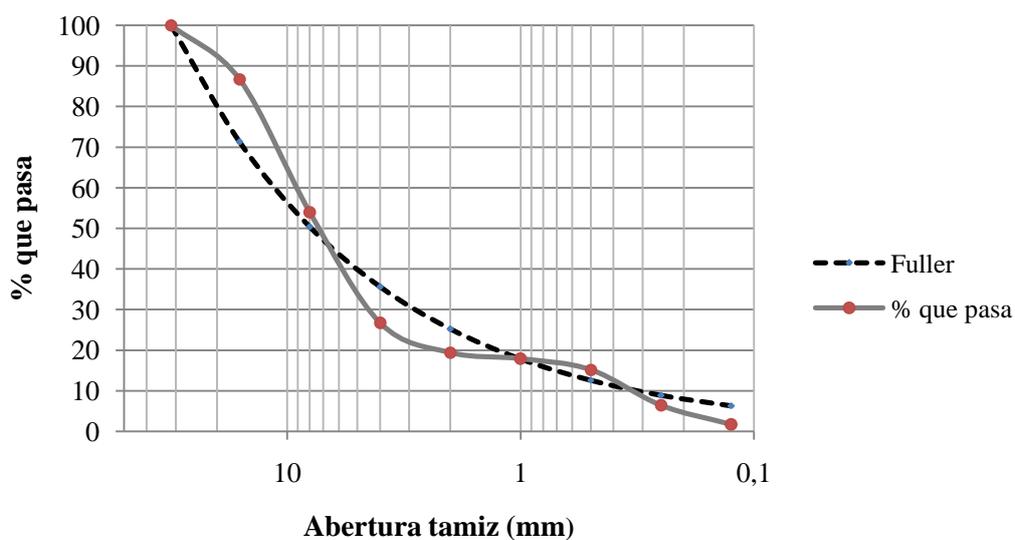


Figura 26: Curva granulométrica de La Peña reciclado

Fuente: Elaboración propia

○ MÉTODO DE LA PEÑA HORMIGÓN NATURAL

Tabla 29: Porcentaje que pasa y proporción de arena, gravilla y grava por La Peña

Tamiz (mm)	Fuller	Arena	Gravilla	Grava	Mezcla
	Proporción=	27,9	39,6	32,5	100,0
31,5	100,0	100	100	100	100,0
16	71,3	100	100	30,7	77,5
8	50,4	100	48,6	0,9	47,5
4	35,6	94	0,5	0,9	26,8
2	25,2	85,1	0,3	0,9	24,2
1	17,8	80	0,3	0,9	22,8
0,5	12,6	67,6	0,3	0,9	19,3
0,25	8,9	27,5	0,2	0,9	8,1
0,125	6,3	6,2	0,2	0,9	2,1
MG:	5,72	2,396	6,496	7,63	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30: Ajuste por módulos granulométricos (La Peña natural)

Áridos	Tamices	MG árido	MGB	% buscado	% en volumen
Grava	31,5	7,63	5,72	t3	32,5
Gravilla	16	6,496	4,80	t2	39,6
Arena	4	2,396	3,01	t1	27,9

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31: Correcciones y dosificación final de La Peña natural

Mezcla	V (L)	exceso cemento	Compactación con vibrado	Volumen corregido	Masa	hormigonera
Grava	234,94		9,4	244,33	626 kg	13,277 kg
Gravilla	286,19		-6	280,19	706 kg	14,987 kg
Arena	202,1	-37,8	-3,4	157,5	394 kg	8,358 kg
Cemento	96,8	37,8		137,96	428 kg	9,078 kg
Agua	205			205	205 kg	4,351 kg

Fuente: Elaboración propia

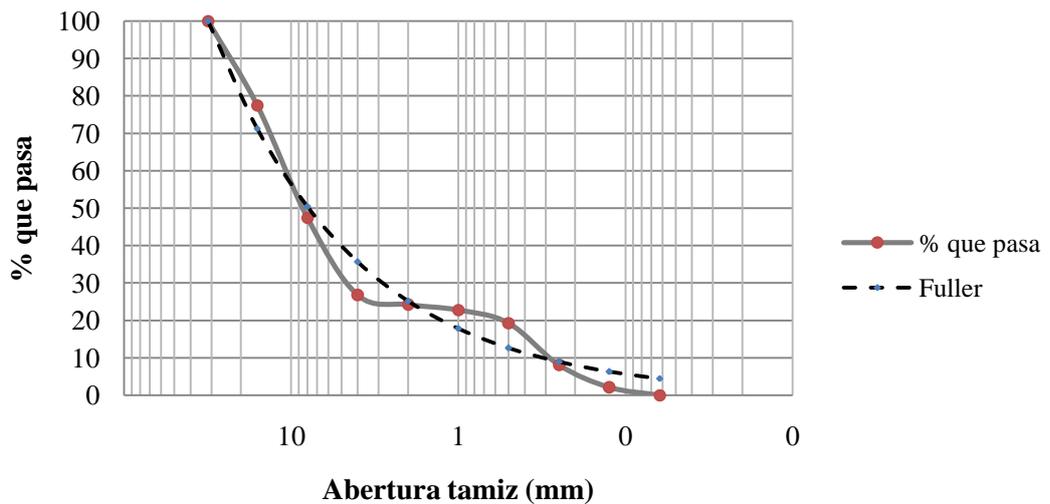


Figura 27: Curva granulométrica de La Peña natural

Fuente: Elaboración propia

Siempre que se elaboraba una amasada se determinaba a continuación la consistencia que se obtenía de cada una. Todas las amasadas fueron calculadas para esperar tanto para el hormigón natural como para el reciclado una consistencia blanda, pretendiendo que el asiento estuviese entre 7 y 8 cm para encontrarse dentro de lo establecido en la norma.

Los componentes de la masa van a tener gran importancia en la oposición a experimentar deformaciones, es decir, en la consistencia que dependerá o se verá muy influenciada por la forma, granulometría, tipo de árido y sobre todo por la dosificación del cemento y el contenido de agua aplicado en la amasada, por eso pueden existir tantas diferencias en los valores obtenidos entre hormigón natural y reciclado.

La docilidad que el hormigón presente también es de gran importancia porque determinará la facilidad en la que las cantidades calculadas de áridos, cemento y agua sean capaces de transformarse en hormigón y además hará que la mezcla pueda ser más fácil de trabajar y compactar en los moldes, influyen en la resistencia final que este obtenga y en la producción o no de segregado o exudado y, por lo tanto, en el aspecto final de las probetas.

Los resultados finalmente obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 32: Agua, cemento y consistencias de Fuller, Bolomey y La Peña

CONSISTENCIAS		FULLER	BOLOMEY	LA PEÑA
NATURAL	agua (kg)	5	4,351	4,351
	cemento (kg)	9,08	7,896	9,078
	asiento (cm)	20	20	3,5
RECICLADO	agua (kg)	5	4,288	4,882
	cemento (kg)	9,08	7,796	8,889
	asiento (cm)	2,2	1	3,5

Fuente: Elaboración propia

En el caso de Fuller se pretendió usar la misma dosificación para ambos hormigones, al obtener una consistencia tan líquida en el hormigón natural se pensó que el problema había sido utilizar el volumen de agua establecido para el árido machacado en vez de coger el valor de árido rodado como venía en la documentación consultada.

Además la cantidad de cemento es muy grande, por lo que parte del agua empleada la ha podido utilizar el cemento para humedecerse y formar la pasta de unión entre todos los componentes, aunque con un incremento de cemento se mejora la docilidad del hormigón, que es lo que ha ocurrido en este caso, ya que la compactación y trabajabilidad fue sencilla segregando incluso líquido rellenando los huecos a la hora de llevar a cabo la compactación.

Es en el que mayor cantidad de agua se ha empleado pero aún así no se ha obtenido un asiento muy grande en el reciclado quedándose con una consistencia más bien seca dejando claro y confirmando lo establecido por documentación, es decir, que los áridos reciclados presentan una gran porosidad y absorción. Las probetas presentaban buen aspecto final como se puede observar en la imagen a continuación.



Figura 28: Hormigón natural (izq) y reciclado (dcha) método de Fuller

Fuente: Elaboración propia

Para el método de Bolomey ya se utilizaron los valores de cantidad de agua establecido para cada caso, intentando así evitar la consistencia líquida de Fuller para el hormigón natural; pero este no fue el resultado obtenido, ya que no se consiguió la consistencia esperada a pesar de presentar menos cantidad de agua que en el anterior caso, lo que hace pensar que el asiento en el método de Fuller no se vio tan influenciado por utilizar las mismas cantidades tanto para hormigón natural como reciclado sino a otros parámetros.

Para este método se optó por utilizar el contenido de agua para el hormigón convencional establecido en la documentación para el método de La Peña ya que da mayor cantidad de valores, mientras que para el reciclado se mantuvo la elección como en el caso anterior pero variando el dato de diámetro al establecido para un árido de diámetro máximo de 16 mm, ya que aunque el tamaño máximo de árido para este caso sea 20 mm, no se ha empleado dicho tamaño en la mezcla. Tras los resultados obtenidos se puede pensar que esta elección no fue buena ya que al no coger los datos del mismo lugar, el árido reciclado presenta menor cantidad de agua que el natural siendo esto ilógico, ya que el reciclado necesita mayor cantidad de agua por la mayor absorción que este presenta debido al mortero adherido a su estructura, por lo que se obtuvo finalmente una consistencia seca con un asiento de 1 cm.

El contenido de cemento es inferior a los otros casos por el hecho de considerarlo un árido más para su dosificación, siendo bueno desde el punto de vista ecológico ya que se produce ahorro de dicho material. El agua en el hormigón natural, es igual que la establecida para el método de La Peña pero aun así se han obtenido asientos muy dispares, esto puede deberse a que el contenido de cemento para La Peña es mucho mayor, pudiendo producir una pasta de cemento más densa sosteniendo mejor la mezcla y evitando así una mayor deformación.

A pesar de todo esto la trabajabilidad y compactación fue buena ya que aunque un hormigón presente una consistencia seca y la consistencia y la docilidad sean parámetros muy relacionados entre sí, la docilidad viene ligada al método de elaboración y al vibrado, que en este caso igual que en todos se realizó con un vibrador de punta mezclando mejor los componentes y produciendo exudado, pudiendo haber variado en el caso de haber realizado una compactación con picado con barra. El aspecto de las probetas fue bueno también como se puede ver en la figura 29.



Figura 29: Hormigón natural (izq) y reciclado (dcha) método de Bolomey

Fuente: Elaboración propia

En el método de La Peña se han obtenido unos valores muy homogéneos tanto para los datos de agua y cemento como en el asiento obtenido en los dos casos, que ha sido el mismo. Es cierto que los valores se asemejan más debido a que en el hormigón natural se disminuyó la relación agua/cemento a 0,48, esto es porque los cálculos se hacen teniendo en cuenta la resistencia inicial y no dicha relación, por lo que no se pudo ajustar el valor para que fuera el mismo a todos los demás casos pero se intentó asemejar lo máximo posible aumentando la resistencia esperada a 31,5 MPa en vez de a 25MPa.

De todas formas no se ha llegado a presentar la consistencia blanda tampoco, pero se ha quedado en ambos casos con un asiento de 3,5 cm, es decir, consistencia plástica acercándose más que los demás métodos empleados e incluso llegando a pensar que ajustándose mejor los cálculos y aumentando la cantidad de agua se podría llegar a blanda. Además durante su elaboración al observar la amasada con árido convencional, parecía que tendría una tendencia a presentar consistencia fluida, por ello para evitarlo se decidió no aplicar todo el agua calculada inicialmente quedando con 3,802 kg variando la relación agua/cemento a 0,42 y dando a pensar que probablemente si se hubiera añadido todo el contenido de agua se podría haber obtenido en la amasada natural el asiento blando esperado.

Comparando los valores del reciclado con el método de Fuller se puede observar que aun habiendo realizado en este caso la dosificación sin tamizado previo a diferencia de Fuller donde se han dividido las distintas fracciones de árido, se han obtenido valores bastante homogéneos entre ambos dándonos a pensar que las granulométricas establecidas para los dos casos son similares, es decir, que tanto los datos proporcionados por la empresa como los datos de un estudio anterior de caracterización

han obtenido valores semejantes y que sería válido e incluso más parecido al caso de puesta en obra real, coger los kilos calculados de grava, gravilla y arena según las proporciones de cada uno. El aspecto final que presentaban las probetas son los representados a continuación.



Figura 30: Hormigón natural (izq) y reciclado (dcha) método de La Peña

Fuente: Elaboración propia

Finalmente se ha elaborado una gráfica comparativa de estos tres aspectos tratados para los distintos métodos, donde se puede ver la similitud de todos los valores obtenidos a excepción de la gran diferencia de asientos conseguidos para el hormigón natural en los métodos de Bolomey y Fuller.

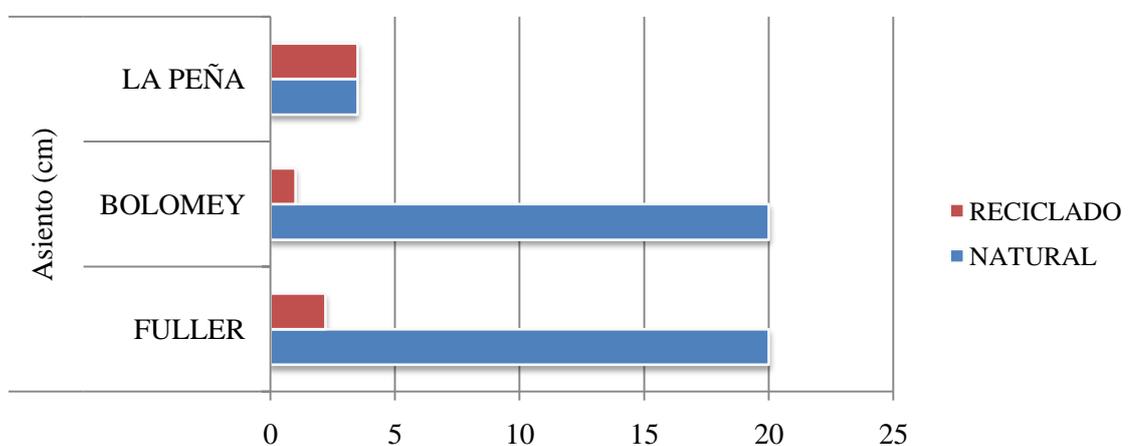


Figura 31: Comparativa del asiento para Fuller, Bolomey y La Peña

Fuente: Elaboración propia

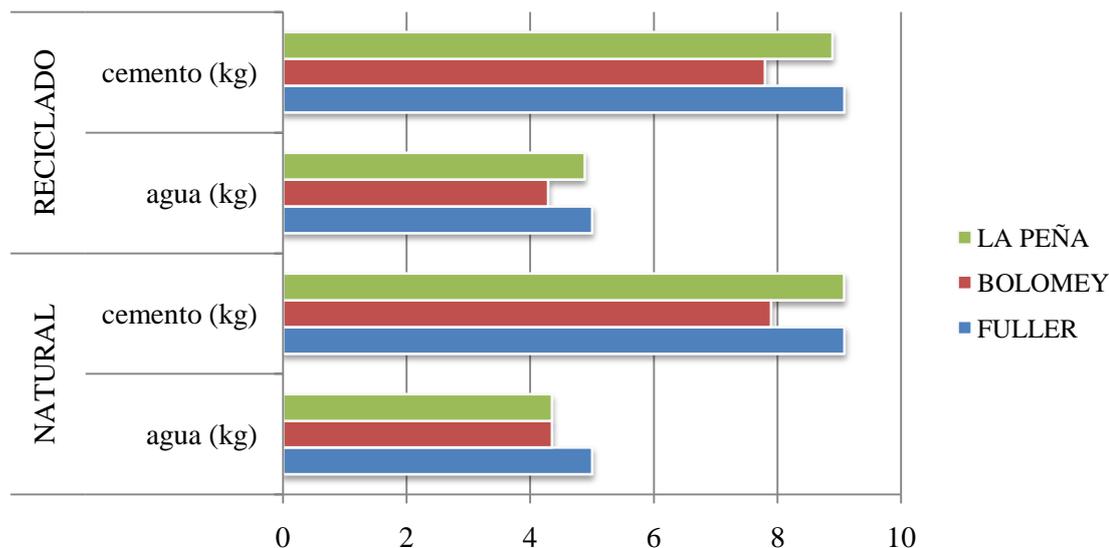


Figura 32: Comparativa del contenido en agua y cemento para Fuller, Bolomey y La Peña

Fuente: Elaboración propia

Los resultados del ensayo de rotura a compresión elaborado a los 28 días fueron:

Tabla 33: Resultados ensayo de rotura a compresión

RESISTENCIAS A COMPRESIÓN					
NATURAL			RECICLADO		
MÉTODO FULLER					
ID	kN	MPa	ID	kN	MPa
1	290,5	37	1	260,3	33,16
2	273,1	34,79	2	247,1	31,48
3	309,3	39,41	3	264,7	33,71
4	302,9	38,59	4	303,1	38,61
5	296,5	37,77	5	300	38,21
MÉTODO BOLOMEY					
ID	kN	MPa	ID	kN	MPa
1	238,9	30,44	1	205,5	26,18
2	218,4	27,82	2	181,8	23,15
3	262,3	33,41	3	180,6	23,01
4	244	31,08	4	188,9	24,07
5	239,7	30,54	5	240	30,57
MÉTODO DE LA PEÑA					
ID	kN	MPa	ID	kN	MPa
1	298,3	38	1	418	53,23
2	315,4	40,18	2	381,5	48,25
3	336	42,81	3	437,2	55,7
4	296,6	37,78	4	420,5	53,56
5	427,2	54,43	5	440,3	56,09

Fuente: Elaboración propia

En general podría parecer que los resultados obtenidos son buenos, aunque a primera vista ya se pueden ver algunas diferencias. En principio la mayoría de los valores superan los 25 MPa que sería el valor límite para considerar un hormigón estructural de calidad en cuanto a resistencia, a excepción del hormigón reciclado por el método de Bolomey donde ya se ven datos que no superan el valor anteriormente establecido. Para comprobarlo y poder comparar los valores de una forma más sencilla y correcta como se especificó anteriormente, se elaboró otra tabla con las resistencias medias (f_{cm}), características (f_{ck}) y la uniformidad de los resultados de cada método representada a continuación.

Tabla 34: Resistencias medias, características y uniformidad para Fuller, Bolomey y de La Peña

Métodos	NATURAL			RECICLADO		
	f_{cm}	f_{ck}	uniformidad	f_{cm}	f_{ck}	uniformidad
FULLER	37,51	34,61	4,71%	35,03	29,80	9,11%
BOLOMEY	30,66	27,39	6,50%	25,40	20,22	12,43%
DE LA PEÑA	42,64	31,33	16,17%	53,37	48,24	5,86%

Fuente: Elaboración propia

En primer lugar se puede observar que todos han obtenido buenos resultados de resistencia a compresión a excepción del hormigón reciclado realizado con el método de Bolomey que ha obtenido un resultado inferior al esperado, aunque el hormigón natural elaborado por el mismo método sí ha superado los 25 MPa, ha obtenido también el valor más bajo en comparación con los otros. Este resultado era de esperar puesto que el método de Bolomey integra al cemento como un árido más en su dosificación presentando cantidades inferiores respecto a los otros métodos y como el cemento es el elemento más activo en la mezcla, su contenido es muy determinante en la resistencia del hormigón a cualquier edad, llegando en ocasiones a hacer la afirmación de que cuanto mayor cantidad de cemento mayor resistencia, cosa que se ha cumplido en el caso del hormigón natural por dicho método pero, para el hormigón natural elaborado por el método de Fuller, se puede observar que presenta mayor resistencia que el de La Peña y prácticamente tienen la misma cantidad de cemento, además el hormigón reciclado elaborado con este último método ha obtenido mayor resistencia que el de Fuller el cual presentan mayor contenido de dicho elemento.

Otro punto a destacar es que como era de esperar todas las elaboraciones con árido natural han obtenido buenos resultados, en cambio uno de los resultados de reciclado no ha sido bueno.

Aún así en principio se podría decir que el árido reciclado empleado es de buena calidad ya que los otros dos ensayos han dado muy buenos resultados, incluso uno de ellos es el valor más alto en comparación con todos los métodos, tanto naturales como reciclados, indicándonos que pese a la heterogeneidad de su composición y a no conocer el comportamiento que puede presentar dicho tipo de árido además de no existir una fiabilidad por parte de la calidad de este comprometida por la resistencia que obtenga, entre los áridos gruesos reciclados el parámetro de mayor importancia a tener en cuenta es la calidad inicial de ellos en cuanto a la reacción tardía de deshidratación del mortero adherido a la superficie o la absorción retardada de agua de los reciclados, es decir, la alta calidad de los áridos reciclados que se utilicen tendrán un efecto positivo en la resistencias a compresión finalmente obtenidas.

La uniformidad de los datos ha sido excelente en el caso de los métodos de Bolomey y Fuller para hormigón natural y el de La Peña para hormigón reciclado, ya que son inferiores del 10 % establecido por la EHE-08, lo que quiere decir que se obtendrían hormigones de muy buena calidad con una alta fiabilidad. La uniformidad obtenida por el hormigón reciclado por el método de Bolomey se podría considerar buena y por último el hormigón natural elaborado por el método de La Peña se consideraría regular.

Finalmente se podría decir que para el presente estudio el hormigón natural elaborado por el método de Fuller es el que mejores resistencias ha presentado en comparación con los otros hormigones convencionales, mientras que el hormigón reciclado elaborado por el método de La Peña ha sido el mejor tanto para los hormigones reciclados como para los hormigones convencionales.

Como conclusión final y teniendo en cuenta tanto la consistencia como la resistencia a compresión, se podría establecer que el hormigón reciclado por el método de La Peña ha obtenido las mejores resistencia, uniformidad y, a pesar de no obtenerse una consistencia blanda, se ha logrado el asiento más aproximado a este valor, confirmando la calidad del árido y la posibilidad de implementar este en la elaboración de hormigones en masa en un caso real.

A continuación se ha realizado un gráfico comparativo con los resultados de las resistencias características (f_{ck}) para reciclado y natural para todos los métodos.

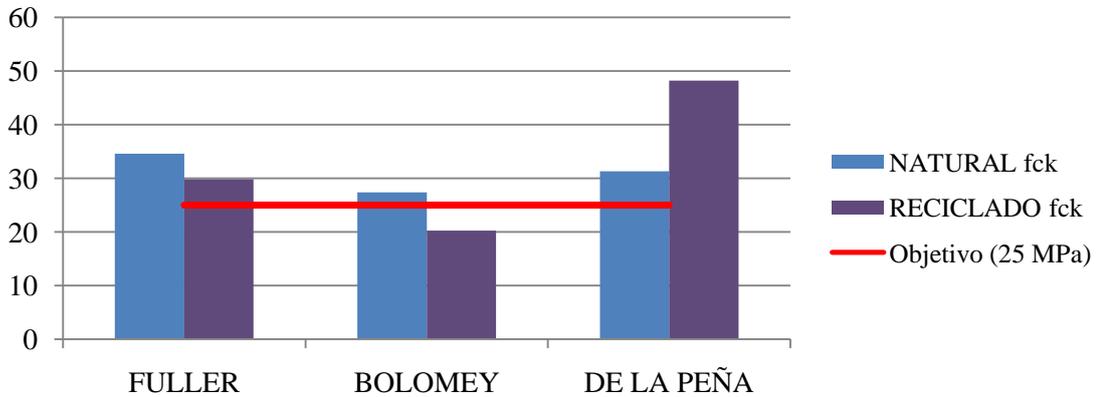


Figura 33: Comparativa f_{ck} entre natural y reciclado para Fuller, Bolomey y La Peña

Fuente: Elaboración propia

En todos estos ensayo también se elaboró una probeta cilíndrica para cada método (tanto en el hormigón convencional como en el reciclado) de dimensiones 150 x 300 mm, ya que es la medida establecida y recomendada por norma debido a que tras la elaboración de una serie de pruebas sobre probetas de distintos tamaños y diferentes relaciones altura diámetro, los cilindros de dichas dimensiones presentaban resistencias más semejantes a aquellas para las cuales había sido diseñado las mezcla de hormigón, estableciéndose esta medida como las recomendadas para el control de calidad y recomendándose también que la relación diámetro/tamaño máximo de árido no fuera superior a tres, cosa que en este caso se cumple para ambos tamaños de probeta.

Son muchas las investigaciones elaboradas para determinar cuál es la influencia de las dimensiones del hormigón en las resistencias finalmente obtenidas (Gonnerman, 1925; Tucker J., 1927) donde principalmente estudian si existe relación alguna entre el diámetro máximo de árido añadido con el diámetro de la probeta empleada. En general muchas autores buscan cuál sería el parámetro determinante o qué factores influyen para la obtención de resistencias con probetas de distintos tamaños.

En este caso en particular las resistencias obtenidas para las probetas de 150x300 mm han sido bastante malas. A pesar de presentar las mismas dosificaciones y tener un aspecto exterior bueno, no han sido capaces de obtener buenos resultados de resistencia a excepción de las elaboradas con el método de Fuller natural (39,09 MPa) y el de Bolomey reciclado (36,88 MPa).

Es cierto que las probetas de menor tamaño obtienen mayores valores de resistencia a compresión, pero aún así no es normal que existan tanta disparidad en comparación a las otras probetas elaboradas con el mismo método, lo que nos lleva a pensar que probablemente la ejecución fuese mala debido a que la compactación no se realizó de forma correcta, probablemente hecha demasiado rápida y no llegando con el vibrador de punta hasta el fondo de la probeta al ser de mayor longitud.

Además siempre eran las últimas en elaborarse con el material sobrante de la amasada que probablemente, estuviese más concentrado en árido grueso ya que es el más dificultoso para coger con la pala, estando la masa más seca ya que había transcurrido mayor tiempo sin moverse las paletas de la hormigonera y notándose también el cansancio por nuestra parte.

Hay que tener en cuenta que solo se elaboró una probeta para cada amasada siendo muy poco concluyente los valores obtenidos, ya que no tenemos más datos para realizar una comparación o para poder confirmar cuales son los parámetros que finalmente han influenciado en los resultados de resistencia a compresión para estos casos. Es por esto que se decidió no incorporar las resistencias obtenidas en este caso en los resultados para cada método.

4.2.- Resultados de la influencia del aditivo en hormigón reciclado (método de faury)

Primero se representarán como en el anterior apartado los valores obtenidos tras la dosificación y la curva granulométrica en cada caso.

En todos los casos el aditivo fue aplicado en un 0,8 %, siguiendo las recomendaciones del fabricante.

Todas las dosificaciones están elaboradas por el método de Faury tomando como referencia la dosificación elaborada por una tesis anterior (García González, 2016), pero entre sí presentan algunas diferencias:

- En primer lugar al ajustar la dosificación ya elaborada a los tamices que se encontraban en el laboratorio, se vieron una serie de irregularidades en las curvas granulométricas que se decidieron corregir suavizando la curva.

- Posteriormente tras los resultados obtenidos se decidió emplear la dosificación sin la suavización de la curva pero manteniendo todos los parámetros iguales.
 - Finalmente al observar una continua segregación de los hormigones obtenidos, se decidió reducir el contenido de áridos de mayor tamaño a la mitad y añadir esa cantidad a la fracción de 4 mm.
- MÉTODO DE FAURY HORMIGÓN RECICADO

Tabla 35: Dosificación Faury curva suavizada

1.DOSIFICACIÓN CURVA SUAVIZADA		
tamices (mm)	reciclado (g)	natural (g)
16	7860	
12,5	4792,8	
8	3787,2	
6,3	2290	
4	3723,4	638
2	2798,3	638
1		1148,4
0,63		1045,5
0,25		1761,7
0,16		515,8
0,08		348
CIEGO		284,6

Fuente: Elaboración propia

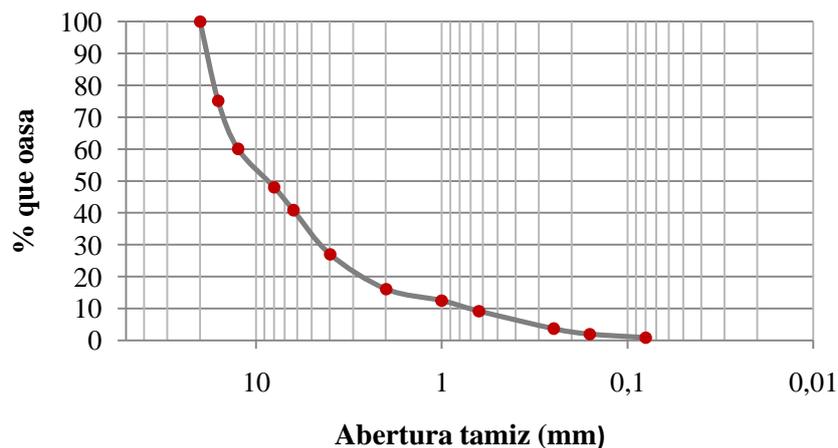


Figura 34: Curva granulométrica suavizada método de Faury

Fuente: Elaboración propia

Tabla 36: Dosificación Faury curva sin suavizar

2.DOSIFICACIÓN SIN SUAIVIZAR		
tamices (mm)	reciclado (g)	natural (g)
16	7860	
12,5	4792,8	
8	3787,2	
6,3	2290	
4	6530	638
2		638
1		1148,4
0,63		1045,5
0,25		1761,7
0,16		515,8
0,08		348
< 0,08		284,6

Fuente: Elaboración propia

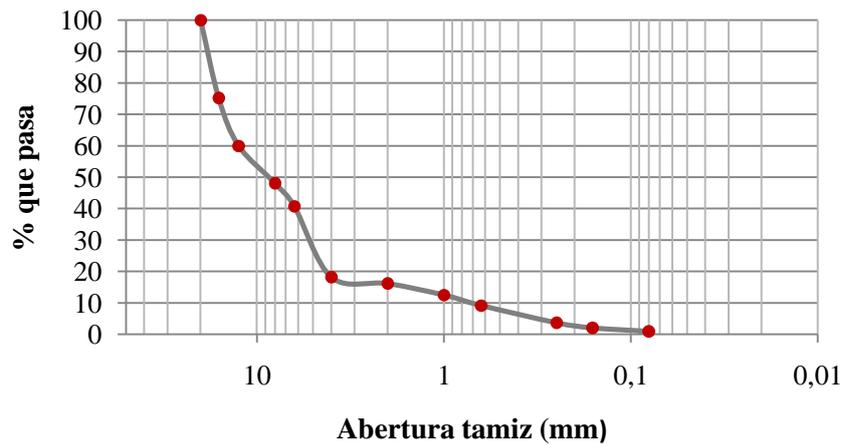


Figura 35: Curva granulométrica sin suavizar método de Faury

Fuente: Elaboración propia

Tabla 36: Dosificación Faury modificada sin aditivo

3.DOSIFICACIÓN MODIFICADA		
tamices (mm)	reciclado (g)	natural (g)
16	3930	
12,5	4792,8	
8	3787,2	
6,3	2290	
4	6530	4568
2		638
1		1148,4
0,63		1045,5
0,25		1761,7
0,16		515,8
0,08		348
< 0,08		284,6

Fuente: Elaboración propia

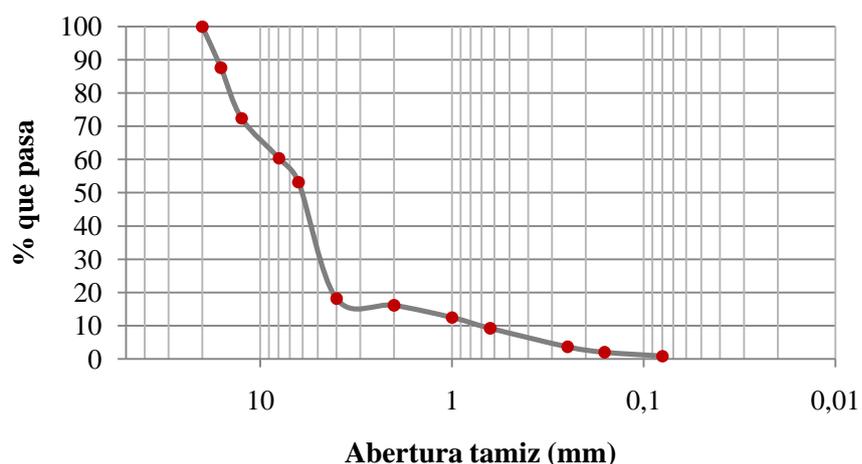


Figura 36: Curva granulométrica modificada método de Faury

Fuente: Elaboración propia

Tabla 37: Comparación de distintos parámetros entre los tres métodos de Faury

Datos	FAURY 1	FAURY 2	FAURY 3
Árido natural (g)	6380	6380	10310
Árido reciclado (g)	25251,7	25260	21330
Agua (g)	2940	2940	3885
Cemento (g)	7370	7370	7370
a/c	0,4	0,4	0,53
Aditivo (g)	60	60	0
Asiento (cm)	0	4,5	0

Fuente: Elaboración propia

El aditivo escogido en todos los casos fue uno de tipo superplastificante como se determinó anteriormente, ya que en un principio son capaces de mantener la misma consistencia reduciendo las necesidades de agua, lo que conllevará en una mejora de la resistencia ya que la relación agua/cemento efectiva será menor, que sería justamente lo necesario para los hormigones con áridos reciclados ya que presentan una gran absorción respecto los áridos naturales.

En el método de Faury inicialmente elaborado no se obtuvieron buenos resultados de consistencia a pesar de la aplicación del aditivo. En un principio se pensó que podría deberse a las modificaciones elaboradas en la curva granulométrica inicial, ya que como se determinó anteriormente, se partió de una dosificación ya elaborada y que funcionaba bien pero se corrigió la curva debido a que aparecían unas serie de irregularidades que al principio no se veían lógicas, por lo que no se siguió el método de dosificación de forma correcta al variar dichos valores.

De todas formas, parece que en este caso la aplicación del superplastificante no tuvo ningún resultado positivo ya que además de no conseguirse nada de asiento quedando una consistencia seca, la trabajabilidad era muy mala, con mucha dificultad para manejar el amasado. El aspecto final por lo tanto fue también malo, no se produjo una mezcla homogénea ya que incluso quedaron los áridos gruesos en la zona superior de la probeta dando un primer indicio de que el aditivo estaba funcionando de forma incorrecta produciendo incluso su contraindicación: la segregación de los áridos.



Figura 37: Cono de Abrams y probetas método de Faury 1

Fuente: Elaboración propia

En el segundo ensayo elaborado, se decidió mantener los mismos parámetros con la diferencia respecto del anterior de que no se realizaron las modificaciones anteriormente determinadas en la curva granulométrica de referencia. Sí que se pudo

observar una mejora respecto a los anteriores en cuanto a su aspecto, ya que no presentaban tanta heterogeneidad, aun así los resultados tampoco fueron del todo buenos ya que como se determinó previamente, el aspecto mejoró respecto al anterior pero siguió siendo malo.

Durante la amasada se comprobó que no se llegó a producir una mezcla homogénea, los áridos gruesos reciclados no estaban del todo cubiertos ni integrados por la pasta formada con el cemento y el agua, además la trabajabilidad también era muy mala, costaba incluso rellenar correctamente las probetas al igual que en el caso anterior y, a pesar de presentar un aspecto tan seco, se podía observar como la mezcla producía exudado, pareciendo que una parte del agua-aditivo aplicado al árido no fuera capaz de absorberlo ni el cemento capaz de utilizarlo para la formación de la pasta final. Esto puede deberse a que en este tipo de aditivos se produce una dispersión entre las partículas de cemento, por lo que presentan una rápida hidratación inicial de este al existir más contacto entre sus partículas y el agua pudiendo provocar que pasado ese tiempo, no se continuase con la hidratación.



Figura 38: Amasada Faury 2

Fuente: Elaboración propia

Es verdad que a pesar de presentar ese aspecto tan seco y la docilidad mala, se consiguió aumentar el asiento en el cono de Abrams a 4,5 cm, demostrando que aunque

en un principio no parece irle bien este tipo de aditivos a las amasadas con áridos reciclados en estos ensayos, sí que consigue que con cantidades inferiores de agua, presenten una relación agua/cemento más efectiva produciendo mejores asientos que si no existiera la aplicación de este. Por último también parece que la mezcla no integra del todo bien los áridos de mayor tamaño dando a pensar en la posibilidad de realizar dosificaciones disminuyendo este valor y aumentando el contenido de árido más fino.



Figura 39: Cono de Abrams y probetas Faury 2

Fuente: Elaboración propia

Finalmente se elaboró la amasada con el método de Faury sin emplear el aditivo para establecer la comparación con los casos anteriores, también se decidió modificar la cantidad de árido grueso al comprobar que parecía que las mezclas no integraban bien un árido de tanto tamaño, por lo que se decidió realizar un tanteo disminuyendo el árido grueso reciclado más grande a la mitad e incorporando ese valor retirado a la fracción de 4 mm. Como no se va a emplear aditivo el cual permite trabajar con cantidades inferiores de agua, se decidió ampliar el contenido de esta hasta una relación agua/cemento 0,5. Posteriormente al ver como estaba quedando la mezcla, se decidieron incorporar 200 ml a la amasada aumentando esta relación a 0,53.

Los resultados que se obtuvieron fueron en primer lugar una mejora considerable de la trabajabilidad respecto a las anteriores, es verdad que la consistencia fue muy seca pero a pesar de esto la mezcla resultó ser bastante homogénea integrando de mejor manera todos los componentes, la compactación fue también mucho mejor que en los casos anteriores e incluso el aspecto de las probetas fue mejor, no quedaron tantas coqueas ni produciendo segregación de ningún tipo.



Figura 40: Cono de Abrams y probetas Faury 3

Fuente: Elaboración propia

Como conclusión final se podría decir que en un principio parece que el aditivo seleccionado no ha funcionado del todo bien para este tipo de árido reciclado, si se ha comprobado que su presencia ha conseguido mejorar la consistencia en el método de Faury 2 con un asiento de 4,5 cm, es decir, una consistencia plástica.

También se ha comprobado que como indicaba el aditivo en los posibles efectos secundarios se ha producido disgregación de los áridos en el primer caso.

Finalmente la dosificación sin empleo de aditivos ha conseguido un mejor hormigón en cuanto aspecto pero con una consistencia seca, reafirmando la influencia del aditivo en la relación agua/cemento efectiva, además a pesar de que el árido reciclado es de buena calidad, el añadir mayor cantidad de fino natural y reducir el árido más grande, es decir, reducir la sustitución de árido reciclado, ha verificado que el empleo de mayor cantidad de reciclado dificulta los resultados obtenidos debido a la gran heterogeneidad de sus propiedades y su mayor porosidad y por lo tanto absorción.

Se realizó el ensayo de rotura a compresión para observar los resultados que se obtenían y tener un parámetro más de comparación a pesar del mal aspecto de las dos primeras amasadas.

Tabla 38: Resultados ensayo de rotura a compresión

RESISTENCIAS A COMPRESIÓN			
FAURY 1 (aditivo)	ID	kN	Mpa
	1	215,9	27,49
	2	191,8	24,42
	3	148,8	18,95
	4	201,3	25,63
FAURY 2 (aditivo)	ID	kN	Mpa
	1	117,8	15,01
	2	183,3	23,35
	3	235,2	29,97
	4	224,4	28,58
FAURY 3 (sin aditivo)	ID	kN	MPa
	1	346,5	44,14
	2	344,4	43,87
	3	333,2	42,44
	4	348,7	44,43
	5	252,1	32,12
	6	267,2	34,04

Fuente: Elaboración propia

Se determinaron como en el caso anterior los valores de resistencias medias, características y uniformidad de los datos obtenidos representados a continuación.

Tabla 39: Resistencias medias, características y uniformidad para el método de Faury

MÉTODO DE FAURY			
	f_{cm}	f_{ck}	uniformidad
ADITIVO	24,12	18,10	15,22%
	24,23	13,12	27,96%
SIN ADITIVO	40,17	31,04	13,87%

Fuente: Elaboración propia

Como era de esperar debido al mal aspecto que presentaban y mala trabajabilidad, posiblemente no se realizase una buena compactación además de existir muchos huecos libres de material dificultando que la transmisión de la fuerza a través de la probeta fuera correcta. La única amasada que ha superado los 25 MPa ha sido la elaborada sin aditivo ya que presentaba el mejor aspecto y como los áridos reciclados en otras pruebas también han conseguido buenas resistencias, esta en principio también funcionaría igual, aun así la uniformidad de los datos se acerca a ser regular por lo que la fiabilidad de los resultados a esperar no es muy buena.

Son curiosos los valores obtenidos con el aditivo, ya que no han funcionado bien con la dosificación ni el material y además lo que se esperaría, como se ha visto en otros estudios, es una mejora de los resultados de resistencia con la adición del superplastificante ya que se consigue una reducción de la relación agua/cemento, disminuyendo por lo tanto el contenido en agua y evitando la repercusión desfavorable que esto conlleva en las resistencias mecánicas.

Por ello finalmente se podría decir que los datos en este estudio obtenidos sirven como tanteo inicial para una investigación o estudio posterior, ya que se necesitarían más ensayos con otras dosificaciones, tipo y cantidad de aditivo a aplicar para poder sacar una conclusión más real y de mayor peso y para poder entender mejor algunos de los resultados obtenidos en este caso.



Figura 41: Comparativa resistencias características métodos de Faury

Fuente: Elaboración propia

4.3.- Resultados hormigón no estructural

El hormigón de limpieza (HL) es aquel que tiene como fin evitar la desecación del hormigón que forma los cimientos así como evitar la desecación de este mismo. Se encuentra en forma de capa situada entre el terreno y los cimientos (Fernández Cánovas, 2011).

A este tipo de hormigones se les puede considerar como especiales ya que no poseen ninguna responsabilidad estructural pero colaboran en las condiciones durables del hormigón estructural o aportan el volumen necesario de un material resistente para conformar la geometría requerida para un fin determinado. Además en la EHE-08 se contemplan este tipo de hormigones en el anejo 18, cosa que hasta la implementación de

este no existía, siendo utilizado de forma irregular en numerosas obras (según EH-91, H-100, H-105).

La única limitación que hay que tener en cuenta en la dosificación es que deben de presentar un contenido mínimo de cemento de 150 kg/m³.

Respecto a los áridos, este tipo de hormigones contemplan la posibilidad de realizar una sustitución del 100 % del árido grueso reciclado siempre que cumpla las especificaciones definidas para el mismo en el anejo 15, siendo esta una utilización directa y muy empleada.

En el caso de la dosificación para este tipo de hormigones, se pueden utilizar los mismos métodos e incluso materiales establecidos para los hormigones convencionales, recomendándose llevar a cabo una pre-saturación o un aumento de la relación agua/cemento como es en este caso.

El método elegido para la elaboración de la dosificación ha sido el método de Faury y tras los resultados obtenidos, se optó por utilizar la dosificación empleada en el apartado anterior para el hormigón que no incorpora aditivo cambiando la relación agua/cemento en este caso.

Tabla 40: Dosificación hormigón no estructural

HORMIGÓN DE LIMPIEZA (FAURY)		
tamices (mm)	reciclado (g)	natural (g)
16	3930	
12,5	4792,8	
8	3787,2	
6,3	2290	
4	6530	4568
2		638
1		1148,4
0,63		1045,5
0,25		1761,7
0,16		515,8
0,08		348
< 0,08		284,6
cantidad de agua (g)		3687
cantidad de cemento (g)		5001
relación a/c		0,74
No lleva ningún tipo de aditivo		

Fuente: Elaboración propia

Respecto al valor obtenido tras el ensayo de consistencia con el cono de Abrams no se consiguió apenas asiento (1 cm) quedando con una consistencia seca. Es cierto que se opta para este tipo de hormigones por emplear consistencias plásticas o blandas, más que nada para que su trabajabilidad y docilidad sea mucho mejor, pero también es cierto que pese a la consistencia obtenida la compactación fue buena y fácil de llevar a cabo al igual que presentaba una fácil trabajabilidad.

Para la otra clase de hormigones estructurales que existe si se determina y recomienda que deberían presentar un contenido bajo de cemento, en los hormigones de limpieza no existe ninguna determinación de este tipo por lo que se optó por disminuir el contenido de cemento respecto a la dosificación de origen para no rebajar el valor de agua ya que los áridos reciclados, como ya se ha determinado en varias ocasiones, presentan gran absorción provocando amasadas duras y secas.

A pesar de la consistencia las probetas tenían buen aspecto como se ve en la figura 42.



Figura 42: Cono de Abrams y probetas hormigón de limpieza

Fuente: Elaboración propia

En el caso de los hormigones no estructurales de otro tipo existentes, se les exige una resistencia característica de 15 MPa, cosa que en los hormigones de limpieza no se especifica ningún valor puesto que su función no es soportar una carga en sí. A pesar de esto si se llevó a cabo en este caso también el ensayo de rotura a compresión para tener una evidencia más de la incorporación de este tipo de árido reciclado en la elaboración del hormigón modificando un parámetro como es la relación agua/cemento, la cual puede considerarse el factor más influyente en la resistencia del hormigón.

Las resistencias obtenidas vienen representadas a continuación.

Tabla 41: Resistencias hormigón de limpieza

RESISTENCIAS HORMIGÓN DE LIMPIEZA		
ID	kN	MPa
1	194,95	24,89
2	226,6	28,87
3	274,5	34,96
4	271,8	34,63

Fuente: Elaboración propia

A pesar de estar todos los valores a excepción de uno dentro de los 25 MPa que debería soportar el hormigón estructural, se realizó de igual forma que en los casos anteriores la resistencia media, característica y la uniformidad.

Tabla 42: Resistencia media, característica y uniformidad del hormigón de limpieza

METODO DE FAURY		
fcm	fck	uniformidad
30,84	22,88	15,73%

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar aunque las probetas presentasen una buena resistencia media y en general los valores ser altos, la resistencia característica está por debajo de lo establecido y con una uniformidad regular, es decir, no existe buena fiabilidad de la calidad en este caso.

Aunque se mantuvo la cantidad de agua que comprometería en mayor medida la resistencia de las probetas en un principio y el aumento del contenido de cemento produce elevadas cantidades de pasta que provocan menos huecos en la probeta y, por lo tanto, mayores resistencias características, no ha ocurrido lo determinado en este caso. Lo que se puede interpretar como que el problema puede deberse al tipo de cemento seleccionado.

De todas formas como se determinó inicialmente, no existe un objetivo o un valor mínimo de resistencia que este tipo de hormigón debiera de cumplir.

Resultado final de resistencia de todos los ensayos:

Después de presentar todos los datos obtenidos de los distintos ensayos elaborados y viendo los diferentes resultados en cuanto a la resistencia a compresión, se pretende representar los factores que han podido influenciar a este parámetro con las

posibles explicaciones que se podrían tener en cuenta en investigaciones posteriores a la hora de realizar hormigón.

El hormigón está compuesto por muchos elementos y durante el tiempo que transcurre desde su elaboración hasta el ensayo de rotura, pasará por diferentes etapas que también influirán en su resistencia final, es decir, el hormigón está influenciado por todo, por lo que es complicado especificar o determinar en qué punto o material se ha podido cometer un error que finalmente influyera en la resistencia.

Por otro lado, el hormigón elaborado con árido reciclado presenta generalmente resistencias inferiores al convencional manteniendo la relación agua/cemento igual para ambos casos, como se ha podido observar en los métodos de Bolomey y Fuller, siendo esta disminución más grande cuanto mayor sea el porcentaje de sustitución. Por lo tanto, además de todo lo especificado de cada una de las amasadas, otros parámetros que han podido influenciar en la resistencia final son:

- El porcentaje de sustitución de árido reciclado, el cual como se adelantaba anteriormente, presenta una gran influencia en la resistencia final, siendo muchas las investigaciones donde se ha estudiado la influencia de este parámetro solamente con sustitución del árido grueso reciclado como es este caso, determinando que las pérdidas pueden oscilar entre un 1 % y un 23 % como en el caso de los métodos de Bolomey y Fuller.
- Como ya se adelantaba anteriormente, la calidad del árido reciclado también influirá en gran medida. Un árido reciclado procedente de un hormigón de baja resistencia o en mal estado, no podrá obtener valores mayores de resistencia que los que presentaba el hormigón de origen. Por el contrario, si el árido reciclado proviene de un hormigón de elevada calidad con una sustitución del árido grueso, podrá presentar resistencias incluso mayores a las del hormigón control, como es el caso ocurrido en la amasada elaborada por el método de La Peña demostrando así que el árido empleado es de buena calidad.
- El contenido de mortero adherido influenciará tanto en la absorción de agua por parte del árido como en la resistencia final que este presente, debido al punto de inflexión que se forma entre la unión del mortero y el cemento.

- El cemento es un elemento con gran importancia en la mezcla tanto para la consistencia como para la resistencia a compresión, es importante para los áridos reciclados realizar un aumento de este componente para mejorar la calidad del hormigón final, aunque en este caso se ha podido observar que es más importante encontrar el equilibrio más óptimo entre el cemento y el agua que incorporar mayor cantidad de este, ya que no se han obtenido las mayores resistencias en los métodos que contienen mayor contenido de cemento como son los métodos de Faury 3 y el de La Peña.
- Con el aditivo se conseguirían inferiores necesidades de agua mejorando la resistencia y la consistencia del hormigón, aunque en este caso no se ha podido comprobar tal efecto porque dicho componente no ha funcionado en la mezcla.
- El tamaño del molde también es un parámetro importante a tener en cuenta a la hora de hacer el ensayo como se ha determinado anteriormente, pero en este caso no se ha podido evaluar la influencia que este presentaría debido a que las probetas de mayor tamaño no obtuvieron buenos resultados por la ejecución y no por sus dimensiones.
- El curado por inmersión garantiza el aumento de la resistencia del hormigón y a pesar de emplear agua potable cumpliendo la calidad exigible para este proceso, se introdujeron muchas probetas de diferentes ensayos a este pudiendo acumularse mayor contenido de materia tanto orgánica como inorgánica que, aunque no tiene tanta influencia como para el agua empleada en el amasado, el curado llevado a cabo por inmersión en agua con los mismos porcentajes de sustancias nocivas que en el otro caso pueden ser más perjudiciales.
- El tiempo de amasado que aunque no es muy influyente en este caso puesto que podíamos ver cómo iba produciéndose la mezcla, no se contabilizó para realizar todas las amasadas de igual forma.
- Realizar una buena compactación es también de gran importancia ya que con ello se conseguirá rellenar todos los huecos de la probeta eliminando el posible aire que pueda existir en el interior, influenciando a las resistencias finales además de producir probetas consolidadas donde la

transferencia de los esfuerzos será más homogénea. Este probablemente haya sido el fallo cometido en la elaboración de las probetas grandes junto a la ejecución en general explicada anteriormente.

- La evolución de las resistencias a compresión del hormigón reciclado durante los 28 días es igual a las obtenidas por el hormigón convencional, pero existen estudios que desarrollan la tendencia que presentan los reciclados a aumentar sus resistencias tras los 28 días, incluso relacionando este parámetro a la velocidad de carga del aparato empleado para la rotura, produciendo reducciones del 9 % de la resistencia obtenida por parte de los hormigones reciclados (González-Fonteboa, 2002). Aunque esta idea no se ha desarrollado de forma muy elevada es cierto que es importante vigilar que se realice el ensayo de forma correcta y que se coloque la probeta lo más centrada posible de los platos que presenta la máquina.

5.- CONCLUSIONES

Después de toda la información recogida acerca de los Residuos de Construcción y Demolición producidos en España y la gestión que se lleva a cabo para transformar el residuo en un recurso como es el ejemplo de los áridos reciclados empleados para la elaboración del hormigón en este estudio, las conclusiones obtenidas al respecto son las siguientes:

1.- Se sigue produciendo, aunque cada vez en menor medida, un gran flujo de RCD que no se deposita de forma correcta, sino en el medio o en el paisaje de manera ilegal y del residuo que sí ha sido controlado, una gran parte termina en vertederos por la falta de demanda debido al desconocimiento sobre la capacidad de los áridos reciclados y a las resistencias que finalmente presentarán, produciendo contaminación de suelos, agua, etc., y sobre todo un impacto económico negativo, ya que el reciclaje no puede competir con el vertido.

2.- Existe una gran falta de control en los residuos producidos, como se indicaba en un inicio, en distintas fuentes consultadas en este estudio para el mismo año se observaron valores muy dispares de producción de RCD. Esto se debe a que gran parte de los Ayuntamientos no han incorporado en sus normativas municipales la legislación básica del Estado sobre la gestión de este tipo de residuos, desentendiéndose o derivando a la normativa medioambiental específica como es el caso de la Ordenanza municipal reguladora de la limpieza y de residuos del Ayuntamiento de León.

3.- Existe una falta de incentivos económicos que provocan que el tratamiento correcto de los RCD supongan un gran coste en comparación con el vertido de forma ilegal, además de producirse poca demanda de árido reciclado como se determinó anteriormente.

4.- Muchas veces se producen interpretaciones erróneas de la legislación, calificándose en algún caso prácticas ilegales como una valorización. Además como se vio en apartados anteriores, en algunas zonas se introduce como RCD final la tierra generada por el movimiento de tierras mientras que en otras no, produciendo grandes diferencias en el valor final del residuo.

Como conclusión principal se puede destacar que tras ver los resultados obtenidos, el árido reciclado procedente de hormigón para este caso es un árido de calidad, demostrando la viabilidad de producir hormigón estructural con una sustitución de incluso el 100 % de árido grueso convencional por el reciclado, obteniendo buenas

resistencias en los métodos de La Peña, Fuller y Faury 3. A continuación se expondrán las conclusiones relacionadas con la fabricación, los materiales y los parámetros estudiados en este caso que son la consistencia y la resistencia a compresión.

1.- Se puede utilizar el mismo método de dosificación para los árido reciclados como para los convencionales teniendo en cuenta que los primeros producen variaciones grandes en los resultados debido a la heterogeneidad que presentan en sus propiedades, es decir, es importante tener en cuenta en el cálculo los efectos que produce el árido reciclado debido a su mayor absorción (que es la principal característica que los diferencia).

2.- El factor más determinante en el cálculo es encontrar cuáles son las cantidades y, por lo tanto, la relación más efectiva entre el agua y el cemento, ya que se ha podido comprobar que en este caso no se han obtenido las mayores resistencias con las mayores adiciones de cemento.

3.- En este estudio se ha observado que un aumento del contenido de cemento no ha producido las resistencias más elevadas como se determinaba anteriormente, siendo el factor representado en la bibliografía consultada, aunque está claro que es un elemento muy importante en la resistencia final que se obtenga ya que es el componente más reactivo en la mezcla e influirá en gran medida en la consistencia obtenida puesto que formará la pasta que recogerá y unirá todos los elementos de la mezcla.

4.- Tampoco se ha podido comprobar que un aumento de agua reduzca la resistencia del hormigón, manifestando la importancia del agua efectiva empleada por el árido reciclado.

5.- Queda demostrada la gran absorción de agua por parte del árido reciclado ya que aun aumentando el contenido de agua se han obtenido consistencias secas debido al mortero adherido al árido.

6.- Hay que tener muy en cuenta la importancia de la elaboración de las amasadas y que se produzca un correcto mezclado de los componentes, ya que influirá en gran medida en los resultados obtenidos, al igual que el posterior curado de las probetas.

7.- En este caso no se ha podido comprobar el beneficio del aditivo en las amasadas en cuanto a resistencia, ya que se han obtenido muy malos resultados, aunque sí que se ha podido verificar en la consistencia ya que con menor relación agua/cemento

y por lo tanto menor agua, se ha conseguido obtener una consistencia plástica en el método de Faury 2 en comparación con otras consistencias secas sin el empleo de dicho aditivo. Sería conveniente realizar más pruebas para poder verificar si el aditivo seleccionado no funciona de forma correcta.

8.- La calidad del árido reciclado procedente de hormigón empleado en este estudio es elevada, consiguiendo obtener resistencias muy buenas e incluso superiores que las obtenidas con el hormigón convencional, como en el caso de la amasada de reciclado elaborada por el método de La Peña.

9.- Las resistencias alcanzadas generalmente en el hormigón reciclado con una sustitución del 100 % del árido reciclado grueso han sido buenas, demostrando que la restricción que propone la EHE-08 de un máximo de sustitución del 20 % para hormigón estructural parece excesivamente conservadora.

10.- Una solución directa, viable y ya muy empleada en la realidad, es el empleo del árido reciclado en hormigones no estructurales como es el caso del hormigón de limpieza que para este estudio, a pesar de aumentar la relación agua/cemento en gran medida y no disminuir la cantidad de agua, se ha obtenido una consistencia seca y además aunque no se exige una resistencia mínima por norma, no se ha conseguido obtener 25 MPa de resistencia.

6.- BIBLIOGRAFÍA

ACI Committee 318 (2014) Building code requirements for structural concrete (ACI 318-14): an ACI standard: commentary on building code requirements for structural concrete (ACI 318R-14), an ACI report. Farmington Hills. American Concrete Institute.

Antolín Rodríguez, A. (2018) *Viabilidad técnica de áridos reciclados de hormigón procedentes de planta. Una solución viable que ahorra recursos y cuida del medio ambiente*. Trabajo Fin de Grado. Universidad de León.

Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (2006) *Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural, Comisión 2-GT2/5- Hormigón Reciclado*. Monografía 11. Madrid: ACHE.

Asociación de Empresas Constructoras y Concesionarias de Infraestructuras (2018) *Página web de la Asociación de Empresas Constructoras y Concesionarias de Infraestructuras*. Disponible en: <https://seopan.es/> (Accedido: 25 abril 2019).

Asociación de Empresas Gestoras de Residuos de la Construcción y Demolición de Castilla y León (2017) *Página web de la Asociación de Empresas Gestoras de Residuos de la Construcción y Demolición de Castilla y León*. Disponible en: <http://www.agerdcyl.es/index.html> (Accedido: 7 abril 2019).

Asociación Española de Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición (2019) *Página web de la Asociación Española de Reciclaje de Residuos de Construcción y demolición*. Disponible en: <http://www.rcdasociacion.es/> (Accedido: 7 abril 2019).

Asociación Nacional de Empresas Fabricantes de Áridos (2015) *Página web de la Asociación Nacional de Empresas Fabricantes de Áridos*. Disponible en: <http://www.aridos.org/> (Accedido: 29 abril 2019).

Ayuntamiento de León (2016) *Ordenanza municipal reguladora de la limpieza y los residuos*. Disponible en: <http://www.aytoleon.es/es/ayuntamiento/ordenanzasDisposicionesReglamentos/ordenanzas/Ordenanza%20Limpieza%20Residuos%202016.pdf> (Accedido: 1 julio 2019).

Bougara, A., Kadri, E.H. y Ezziane K. (2010) "Efficiency of granulated blast furnace slag replacement of cement according to the equivalent binder concept", *Cement and Concrete Composites*, (32), pp. 226-231.

Cabreros García, E.M., Devesa Fernández, C., Gar Esteban, D., Llorente Muñoz, J., Manteca Beneitez, F.J. y García García, J.C. (2017) Guía para la utilización de árido reciclado y recomendaciones para su compra: Utilización de materiales procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD) en obras del municipio de Valladolid. Valladolid: Agrupación Empresarial Innovadora para la Construcción Eficiente (AEICE).

CIMAS (2010) Guía de divulgación para la gestión de los Residuos de Construcción y demolición. Santander: Consejería de Medio Ambiente del Gobierno de Cantabria.

Cuadraro Roura, J. R., López Morales, J. M., Crecente Romero, F.J., León Navarro, M. y Pérez de Armiñán, A. (2010) "El sector construcción en España: Análisis, perspectivas y propuestas", *Cuadernos del Colegio Libre de Eméritos*, pp. 7-194.

España (2002) "Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos", *Boletín Oficial del Estado*, 19 de febrero de 2002 (43), pp. 6494-6515.

España (2008) "Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición", *Boletín Oficial del Estado*, 13 de febrero de 2008 (38).

España (2008) *Instrucción de hormigón estructural: Real Decreto 1247/2008 de 18 de julio*. Madrid: Garceta.

España (2015) "Resolución de 16 de noviembre de 2015, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros de 6 de noviembre de 2015, por el que se aprueba el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022", *Boletín Oficial del Estado*, 12 de diciembre de 2015 (297), pp. 117395-117397.

España. Ministerio de Fomento (2014) *Catálogo de residuos utilizables en construcción*. Disponible en: <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/35/residuos-de-construccion-y-demolicion/> (Accedido: 29 abril 2019).

España. Ministerio de Fomento (sin fecha) *Boletín estadístico online*. Disponible en: <https://apps.fomento.gob.es/Boletinonline/?nivel=2&orden=17000000> (Accedido: 31 marzo 2019).

Eurostat (2014) *Waste generation by economic activities and households, EU-28*. Disponible en: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Waste_generation_by_economic_activities_and_households,_EU-28,_2014_\(%25\)_YB17.png](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Waste_generation_by_economic_activities_and_households,_EU-28,_2014_(%25)_YB17.png) (Accedido: 2 abril 2019).

Eurostat (sin fecha) *Building permits-annual data*. Disponible en: http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=sts_cobp_a&lang=en (Accedido: 31 marzo 2019).

Fernández Cánovas M. (2007) *Hormigón: adaptado a la Instrucción de recepción de cementos y a la Instrucción de hormigón estructural EHE*. 8ª ed. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Fernández Cánovas, M. (2011) *Hormigón: adaptado a la instrucción de recepción de cementos y a la instrucción de hormigón estructural EHE*. 9ª ed. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

García González, J. (2016) *Hormigón elaborado con residuos de construcción y demolición mixtos cerámicos: optimización de sus propiedades físicas, mecánicas y durables mediante pre-saturación de los áridos, uso de superplastificantes y precipitación microbiológica de carbonato cálcico*. Tesis Doctoral. Universidad de León y Universidad de Gante.

Geng Y., Zhao M., Yang H. y Wang Y. (2019) "Creep model of concrete with recycled coarse and fine aggregates that accounts for creep development trend difference between recycled and natural aggregate concrete", *Cement and Concrete Composites*, (103), pp. 303-317.

Gonnerman, H.F. (1925) "Effect of size and shape of test specimen on compressive strength of concrete", *ASTM* (25), pp. 250-237.

González-Fonteboa, B. (2002) *Hormigones con áridos reciclados procedentes de demolición: dosificaciones, propiedades mecánicas y comportamiento estructural a cortante*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica A Coruña.

González-Fonteboa, B. y Martínez-Abella, F. (2005) "Recycled aggregates concrete: aggregate and mix properties", *Materiales de construcción* (55), pp. 53-66.

INE (2019) *Encuesta de población activa*. Disponible en: <https://www.ine.es/> (Accedido: 25 abril 2019).

Jiménez Montoya, P., García Mesenguer, A., Morán Cabré F. (2000) *Hormigón armado: basada en la EHE-2008. Ajustada al Código Modelo y al Eurocódigo*. 14ª ed. Barcelona: Gustavo Gili.

Laserna Arcas, S. (2015) *Avances en el comportamiento del hormigón reciclado, propiedades mecánicas y simulación numérica*. Tesis Doctoral. Universidad de Castilla-La Mancha.

Lotfi, S., Eggimann, M., Wagner, E., Mróz, R. y Deja, J. (2015) "Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology", *Construction and Building Materials* (95), pp. 243-256.

Pacheco, J., de Brito, J., Chastre, C. y Evangelista, L. (2019) "Experimental investigation on the variability of the main mechanical properties of concrete produced with coarse recycled concrete aggregates", *Construction and Building Materials* (201), pp. 110-120.

Proyecto GEAR. Equipo de Investigación Científica (2012) *Guía Española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD)*. Madrid: Fuego.

SIEMCALSA (2018) *El sector de los áridos en Castilla y León*. Disponible en: <http://www.siemcalsa.com/index.php/aridos/116-el-sector-de-los-aridos-en-castilla-y-leon> (Accedido: 7 mayo 2019).

Thomas, J., Nassif Nazeer T. y Wilson, P.M. (2018) "Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates", *Journal of Building Engineering* (19), pp. 349-365.

Tucker, J. (1927). "A study of the compressive strength dispersion of material with applications", *Journal of the Franklin Institute* (204), pp. 751-781.

Xuan, D., Baojian , Z. y Chi Sun, P. (2017) "Durability of recycled aggregate concrete prepared with carbonated recycled concrete aggregates", *Cement and Concrete Composite*, (84), pp. 214-221.

Zaetang, Y., Sata, V., Wongsu, A. y Chindaprasirt, P. (2016) "Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate", *Construction and Building Materials* (111), pp. 15-21.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradecer al profesorado que forma parte del grupo de investigación INMATECO, Dr. Andrés Juan Valdés, Dr. M. Ignacio Guerra Romero, Dra. Julia M^a Morán del Pozo y Dra. Julia García González por haberme dado la oportunidad de participar en este proyecto y por ayudarme en todo el proceso brindándome las herramientas necesarias.

También agradecer a la empresa Reutiliza S.L. por proporcionar los áridos necesarios para la elaboración de los ensayos del presente estudio.

A todas las personas que han formado parte o han participado de alguna forma y que me han acompañado en esta etapa aportando a la formación tanto profesional como personal.

Y finalmente a mis padres y a mi hermana por sus consejos, comprensión, cariño y por el apoyo incondicional y a Luis por confiar en mí en todo momento y acompañarme en cada paso que doy.