

Análisis de la viabilidad de USO DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN como árido reciclado EN LA FABRICACIÓN DE HORMIGÓN



Francisco Javier López Martínez

UNIVERSITAT JAUME I
ESCUELA SUPERIOR DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS EXPERIMENTALES

Área de construcciones arquitectónicas
Castellón de la plana, Noviembre 2015

Directores

Lucía Reig Cerdá

Ángel Miguel Pitarch Roig

Colaboradores

Ana Ester Tomas Catalán

RESUMEN

La generación de residuos es uno de los retos ambientales más complejos a que se enfrentan las sociedades modernas. El incremento en la generación de residuos a escala global es continuo. La prevención y correcta gestión son esenciales, la concepción del residuo como recurso para incorporarlo al sistema productivo es un reto clave y una obligación normativa para los estados miembros de la UE a cumplir antes de 2020 (SGAPC, 2014).

Este estudio pretende investigar si tres de los residuos más frecuentes en la construcción, como son las baldosas, el ladrillo y la cerámica sanitaria, pueden llegar a sustituir el árido natural en diferentes porcentajes, manteniendo la resistencia mínima del hormigón estructural. Con este estudio se pretende revalorizar y dar otro uso a estos residuos cerámicos, generados en gran volumen en la construcción. Ésta es una buena forma de reciclar estos residuos, reduciendo el impacto sobre el medio ambiente.

Este estudio experimental, consta de dos fases bien definidas. La primera fase corresponde a la caracterización de los áridos naturales y reciclados, obteniendo las principales características de los mismos como: granulometría, coeficiente de absorción, densidad aparente, densidad de las partículas, equivalente de arena, fragmentación y coeficiente de forma. Una vez comprobado que las características de los componentes son adecuadas para la fabricación de hormigón reciclado, se han elaborado una dosificación homogénea para el control y los tres residuos con tres grados de incorporación de árido reciclado 14%, 20% y 30% del peso total del árido existente en la amasada. En ningún caso se ha sustituido la granulometría gruesa 10/20, al no disponer de residuos de ese tamaño y se obtuvieron un total de 10 hormigones distintos, que fueron comparados entre ellos. La elevada porosidad de los áridos reciclados exige que las dosificaciones se realicen teniendo en cuenta las pérdidas de agua debidas a la absorción de los mismos, pues ésta reduce la cantidad de agua disponible para llevar a cabo el amasado. Por ello, se ha procedido a corregir el agua antes del amasado, saturando los áridos reciclados obteniendo así una relación agua/cemento efectiva igual en todas las amasadas.

En la segunda fase se determinan las características del hormigón final obtenido y se comparan las distintas sustituciones de árido reciclado, así como los distintos residuos cerámicos y las propiedades del hormigón reciclado con el realizado con árido natural calizo (amasada control). En el ensayo con el cono de Abrams se ha comprobado la trabajabilidad del hormigón, para que esta fuera plástica en todas las amasadas independientemente del árido sustituido. Se ha determinado la resistencia de las probetas mediante el ensayo de rotura a

compresión, se ha procedido a la rotura de las probetas con un curado de 7 y 28 días, comparando los resultados entre los residuos utilizados y la resistencia mínima del hormigón utilizado en el estudio (HA-30).

En lo referente a las principales conclusiones derivadas del estudio, destaca que las propiedades de los áridos reciclados en algunos parámetros son dispersas. Según la EHE-08 en el anejo 15, el máximo que se puede sustituir sin modificar sustancialmente las características del hormigón es un 20% del árido grueso, aproximadamente un 8% del árido total. Sin embargo, en el presente estudio se ha sustituido un 14%, 20% y 30% en peso del árido total, y en todos los casos la trabajabilidad y resistencia a compresión estaban dentro de los límites de la normativa, por lo que se encuentra correcta la utilización de este hormigón reciclado para uso estructural.

SUMMARY

Waste management is one of the most important and complex environmental issues to deal with in the construction sector. The need for an effective waste management is crucial, due to the increasing volume of building and demolition waste generated nowadays. Incorporating waste in the construction process, as raw material for the fabrication of concrete or other materials, is a challenge that European countries should face before 2020, as established in the regulation SGAPC (2014).

This research aims to study if waste products, such as tiles, bricks or the ceramic from sanitary facilities, can be used in the fabrication of concrete. This work analyses to what extent these materials can replace the aggregate typically used to obtain concrete, without changing the mechanical properties of it. Therefore, this study tries to give a secondary use to these waste products, in order to reduce the environmental impact of construction and demolition processes.

In this experimental study two phases can be defined. The first phase is the characterization of the aggregate used in concrete and the waste products studied. The research will determine the principal characteristics of these materials; the grading, absorption coefficient, the bulk density, the density of particles, the sand size equivalent, fragmentation and shape coefficient were analysed and compared to ensure the waste products can be used in the fabrication of recycled concrete. Later, it has been established the correct dosage, which ensures a homogeneous mass, for three different case studies: replacing the aggregate in a 14%, 20% and 30%. Furthermore, the coarse-grained aggregate (10/20) has not been substituted as there was no waste product of this size. Moreover, the waste products have a high porosity, meaning a higher absorption of water. Hence, the dosage should consider this water loss to ensure an effective mixture for the different waste products. By saturating the recycled aggregates, an effective relation water/cement for all the mixture can be defined. As a result of this process, 10 different concrete samples were obtained and compared.

Phase 2 is the characterization of the concrete obtained with the different ceramic waste products before listed. The properties of this resultant concretes are not only compared between each other but also with the concrete that uses a typical aggregate. The characteristics analysed and studied are: the workability and strength of the concrete. The first one has been studied with the Concrete Slump Test (Cono de Abrams) aiming to achieve the

same level of plasticity. On the other hand, to study the strength of the concrete, samples were tested after 7 and 28 days of maturing process, in order to define the compressive strength of the different samples and comparing it to the minimum compressive resistance of the concrete used (HA-30).

In the regulation EHE-08 appendix 15, it is stated that the maximum percentage that can be replaced, without altering the mechanical properties of the concrete, is 20% of the coarse-grained aggregate, which means an 8% of the total of aggregate. However, in this study, a 14%, 20% and 30% of the total of aggregate was substituted. The tests show that these samples achieve a workability and strength within the limits established by the regulations, and hence, this recycled concrete can be used for structural elements.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	6
1.1 Objetivos	7
1.2 Metodología estudio	8
2. ESTUDIO PRELIMINAR DEL PROYECTO	15
2.1 Introducción	15
2.2 Producción de baldosas, ladrillos y sanitarios.....	17
2.3 Residuos generados	18
2.4 Plantas de reciclado	22
2.5 Comparativa europea en gestión de residuos	25
2.6 Normativa aplicable de gestión de residuos	28
2.7 Normativa aplicable para hormigones con áridos reciclados	30
2.8 Conclusiones.....	32
3. DESCRIPCIÓN MATERIALES UTILIZADOS	34
3.1 Introducción	34
3.2 Agua.....	35
3.3 Cemento (CEM II/A-V).....	36
3.4 Aditivo (SKM 230).....	38
3.5 Árido natural calizo	39
3.6 Residuos utilizados.....	40
3.6.1 Introducción	40
3.6.2 Mezcla baldosas cerámicas	41
3.6.3 Ladrillo hueco de pasta roja	42
3.6.4 Productos de cerámica sanitaria	43
3.7 Conclusiones.....	44
4. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS ÁRIDOS UTILIZADOS	46
4.1 Tamizado de los residuos utilizados.....	46
4.1.1 Procedimiento	46
4.1.2 Resultados	47
4.1.3 Comparativa de resultados	52
4.1.4 Conclusiones.....	52

4.2 Coeficiente de absorción.....	53
4.2.1 Procedimiento.....	53
4.2.2 Resultados.....	54
4.2.2.1 Natural (NAT).....	54
4.2.2.2 Baldosas (BAL).....	55
4.2.2.3 Ladrillo (LH).....	55
4.2.2.4 Sanitario (SAN).....	56
4.2.3 Comparativa de resultados.....	57
4.2.4 Conclusiones.....	58
4.3 Densidad aparente.....	59
4.3.1 Procedimiento.....	59
4.3.2 Resultados.....	59
4.3.2.1 Baldosas (BAL).....	59
4.3.2.2 Ladrillo (LH).....	60
4.3.2.3 Sanitario (SAN).....	60
4.3.3 Comparativa de resultados.....	61
4.3.4 Conclusiones.....	62
4.4 Densidad de las partículas.....	63
4.4.1 Procedimiento.....	63
4.4.2 Resultados.....	64
4.4.2.1 Baldosas (BAL).....	64
4.4.2.2 Ladrillo (LH).....	64
4.4.2.3 Sanitario (SAN).....	65
4.4.3 Comparativa de resultados.....	66
4.4.4 Conclusiones.....	67
4.5 Equivalente de arena.....	68
4.5.1 Procedimiento.....	68
4.5.2 Resultados.....	70
4.5.2.1 Natural (NAT).....	70
4.5.2.2 Baldosas (BAL).....	70
4.5.2.3 Ladrillo (LH).....	70
4.5.2.4 Sanitario (SAN).....	71
4.5.3 Comparativa de resultados.....	71

4.5.4 Conclusiones.....	72
4.6 Fragmentación	73
4.6.1 Procedimiento.....	73
4.6.2 Resultados.....	74
4.6.3 Comparativa de resultados	75
4.6.4 Conclusiones.....	76
4.7 Coeficiente de forma.....	77
4.7.1 Procedimiento.....	77
4.7.2 Resultados.....	78
4.7.3 Comparativa de resultados	79
4.7.4 Conclusiones.....	79
4.8 Conclusiones.....	80
5. ENSAYOS PRELIMINARES DEL HORMIGÓN	82
5.1 Introducción	82
5.2 Pruebas dosificación.....	83
5.3 Conclusiones.....	85
6. CORRECCIÓN DE AGUA	87
6.1 Conclusiones.....	89
7. DESARROLLO DEL HORMIGÓN RECICLADO.....	91
7.1 Introducción	91
7.2 Sustitución residuos	92
7.3 Composiciones granulométricas utilizadas.....	93
7.3.1 Comparativa de resultados	103
7.4 Procedimiento amasado	109
7.5 Fabricación de las probetas.....	110
7.6 Caracterización de las probetas	111
7.7 Conclusiones.....	112
8. RESULTADOS DEL ESTUDIO	114
8.1 Introducción	114
8.2 Trabajabilidad del hormigón	115
8.3 Resistencia a compresión del hormigón	116
8.4 Comparativa resultados.....	118
8.4.1 Trabajabilidad del hormigón	118

8.4.2 Rotura a compresión de las probetas	123
8.5 Conclusiones.....	132
9. CONCLUSIONES	134
10. Futuras líneas de trabajo.....	136
11. BIBLIOGRAFÍA	138
AGRADECIMIENTOS.....	141

“La teoría sin los conocimientos prácticos, solo sirve para alucinar la ignorancia y estupidez de los que con el solo caudal de principios y conocimientos superficiales, hacen invertir sumas cuantiosas, sin más seguridad para el dueño, que una esperanza, las más veces fallida.”
(Fornes de Gurrea, 1841)

1. INTRODUCCIÓN

El presente Proyecto Fin de Grado “Análisis de la viabilidad de uso de residuos de la construcción como árido reciclado en la fabricación de hormigón”, realizado en la Universitat Jaume I de Castellón, surge de un uso insostenible de los recursos naturales a nivel mundial y de las nuevas directrices generales sobre un uso más sostenible de éstos recursos. Se ha ejecutado un programa de ensayos de caracterización, tanto de los elementos que componen el material objeto de estudio como del propio hormigón estructural reciclado, así como un profundo análisis y comparación de los resultados obtenidos.

Cada vez es mayor la sensibilización social en el uso de recursos disponibles de la naturaleza, lo cual, lleva a considerar otros materiales como residuos industriales o residuos de construcción que hasta hace unos años era algo improbable.

En el periodo de 2009-2013 la producción de RCD en España es de 154.6 millones de toneladas anuales, de los cuales solo se reciclan 51.4 millones de toneladas anuales, tan solo una tercera parte del total de residuos. Las obras de rehabilitación representan la tipología de obra con porcentaje más alto en la producción de RCD, en el año 2013 el 46% de todos los RCD generados proceden de obras de rehabilitación, un 21% de obras de Ingeniería Civil, un 18% de obras No Residenciales, y un 15% de Obras Residenciales.

En construcción y demolición se generan diferentes tipos de residuos, pero según datos de la Federación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición (FERCD), en el año 2013 se generaron 20 millones de toneladas de residuos, de los cuales, los dos porcentajes más altos de residuos pertenecen a los cerámicos con un 54%, y a los residuos de hormigón con un 12%.

Por lo tanto, si revalorizamos los residuos reutilizándolos, como en este caso para realizar un hormigón estructural, reduciremos notablemente la cantidad de residuos generados, así como la fabricación de áridos naturales, obteniendo un hormigón más sostenible que el actual.

Para llevar a cabo todo este planteamiento a largo plazo, es fundamental una evolución en el campo del reciclaje de residuos, además de una divulgación detallada de las obras realizadas con residuos, y los resultados obtenidos, estas vías son muy importantes para incentivar y promover su utilización.

1.1 Objetivos

El objetivo principal del presente Trabajo Final de Grado es analizar la viabilidad del uso de residuos cerámicos de la construcción en la fabricación de hormigón estructural, para así poder revalorizar estos materiales al tiempo que se desarrolla un hormigón más sostenible.

La elección de los materiales cerámicos se basó en la cantidad de material utilizado en la construcción, la facilidad para poder reutilizarlo sin que perdiera las propiedades físicas, y además tuviera características similares al árido natural calizo. Por ello, se escogieron tres tipologías distintas de productos cerámicos con propiedades diferenciadas, como son residuos de baldosas cerámicas, ladrillos huecos de pasta roja y productos de cerámica sanitaria.

Para alcanzar este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Analizar los residuos cerámicos disponibles, así como sus propiedades y volumen generado.
- Caracterizar las propiedades físicas de los residuos utilizados.
- Comparar las propiedades de los áridos reciclados cerámicos con las de los áridos naturales.
- Determinar los porcentajes de sustitución de árido natural por árido reciclado a utilizar.
- Adecuar el proceso de fabricación de hormigón con áridos naturales, en función de la cantidad de áridos reciclados utilizada.
- Caracterizar el hormigón desarrollado y analizar su idoneidad de cara a un uso estructural.

1.2 Metodología estudio

La metodología utilizada en este estudio, se representara mediante diagramas de flujo, comentando brevemente cada uno de ellos, para definir mejor cada uno de ellos.

En primer lugar se realiza un estudio de normativa y residuos para comprobar la viabilidad del estudio.

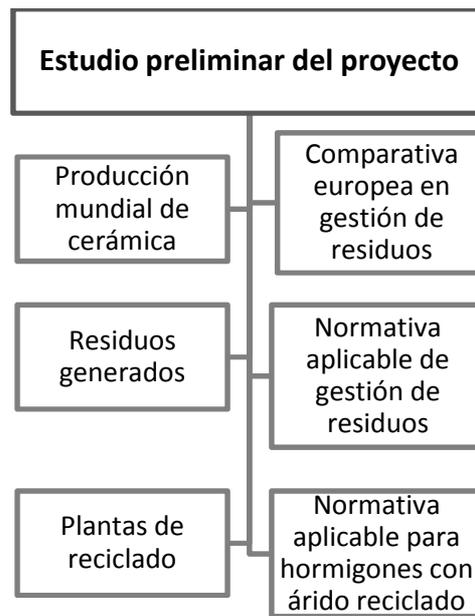


Fig. 1. Diagrama estudio preliminar

Una vez analizado la normativa y los residuos, se procede a la elección de los materiales necesarios para la realización del hormigón, así como de la elección de los tres residuos escogidos que son: Mezcla de baldosas cerámicas, ladrillo de pasta roja y cerámica sanitaria.

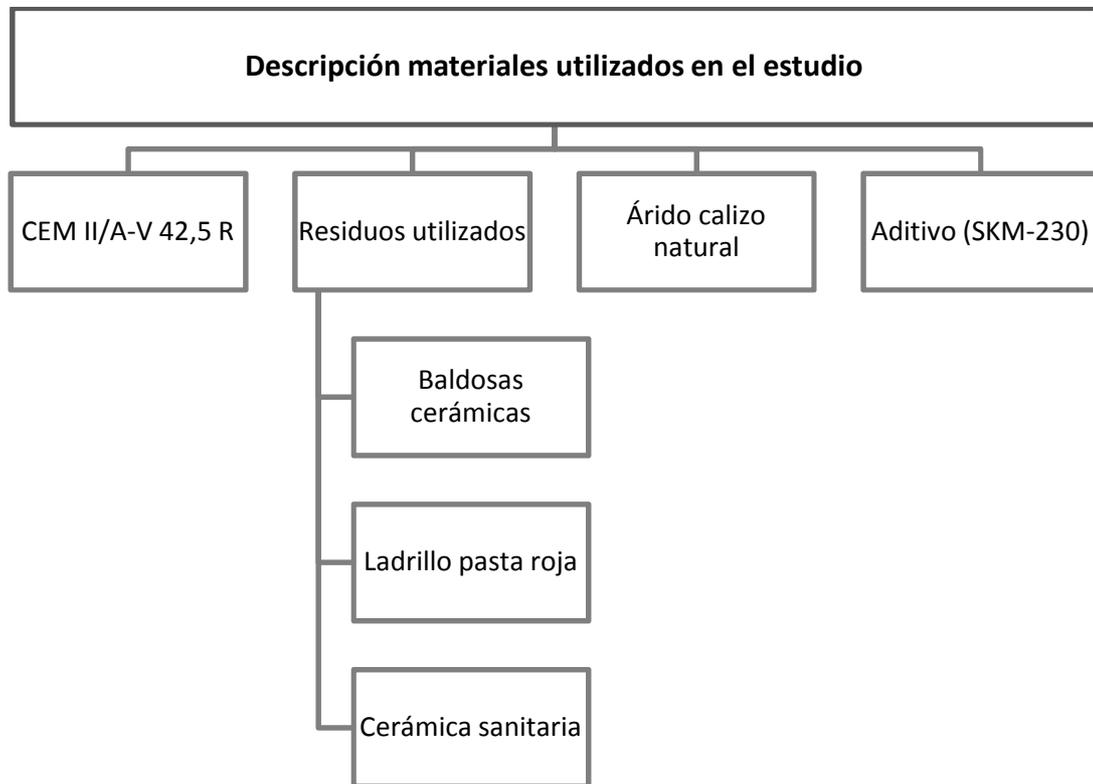


Fig. 2. Diagrama materiales utilizados

Se analizaran el árido calizo natural y los tres residuos escogidos para el estudio, realizando ensayos para la caracterización de todos ellos, para un posterior desarrollo del hormigón más homogéneo.

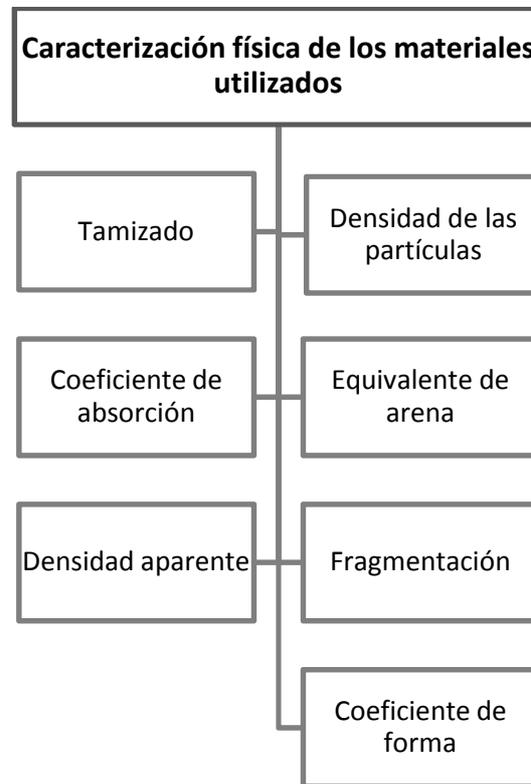


Fig. 3. Diagrama caracterización física materiales utilizados

En la planificación, se realizan primero pruebas de dosificación para hallar una dosificación homogénea para todas las amasadas, después para que todas las amasadas sean más homogéneas, se corrige la absorción de todos áridos contenidos en la amasada.

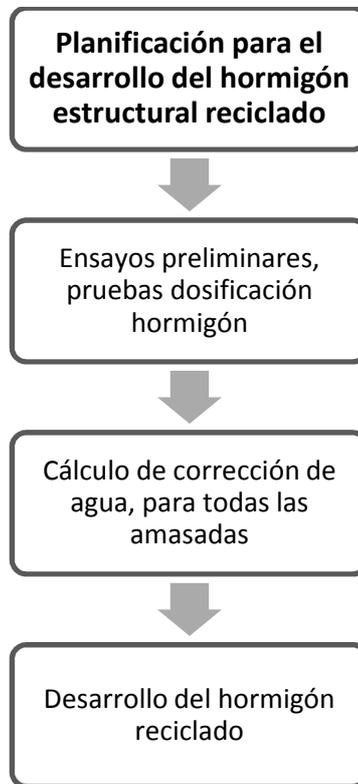


Fig. 4. Diagrama planificación del hormigón

Para desarrollar el hormigón estructural reciclado, se sustituye el porcentaje de árido reciclado determinado en cada amasada (14%, 20%, 30%), obteniendo la composición granulométrica utilizada en cada amasada, así como los procedimientos llevados a cabo para el amasado, fabricación y caracterización de las probetas de hormigón.



Fig. 5. Diagrama desarrollo del hormigón

Finalmente una vez llevado a cabo la planificación y el desarrollo del hormigón estructural, obtenemos los resultados finales. De los tres residuos escogidos (BAL, LH, SAN), se realizan tres amasadas con cada uno de los porcentajes de sustitución, de cada amasada se obtienen: 2 conos de Abrams, 2 probetas para romper a compresión a los 7 días de curado y otras 2 probetas para romper a compresión a los 28 días de curado.

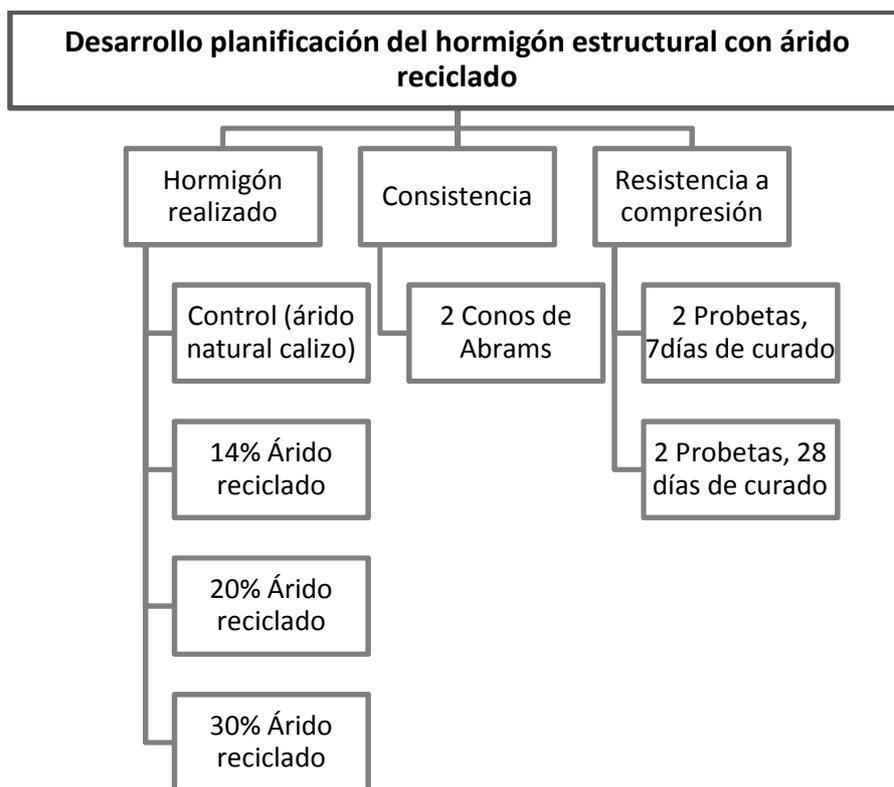


Fig. 6. Diagrama del desarrollo de la planificación

“El conocimiento descansa no solo sobre la verdad sino también sobre el error.” (Carl Jung)

2. ESTUDIO PRELIMINAR DEL PROYECTO

2.1 Introducción

A continuación, para comprender mejor el siguiente estudio, es necesario conocer algunas definiciones particulares de los residuos de construcción y demolición, las definiciones han sido extraídas de la Directiva 2008/98/CE y el real decreto RD 105/2008 y son las siguientes:

- Residuo: cualquier sustancia y objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención o la obligación de desprenderse.
- Residuos peligrosos: residuo que presenta una o varias de las características peligrosas que se enumeran en el Anexo III de la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo.
- Prevención: medidas adoptadas antes de que una sustancia, material o producto se haya convertido en residuo.
- Preparación para la reutilización: la operación consistente en la comprobación, limpieza o reparación, mediante la cual productos o componentes de productos que se hayan convertido en residuos se preparan para que puedan reutilizarse sin ninguna otra transformación previa.
- Reciclado: toda operación de valorización mediante la cual los materiales de residuos son transformados de nuevo en productos, materiales o sustancias, tanto si es con la finalidad original como con cualquier otra finalidad. Incluye la transformación del material orgánico, pero no la valorización energética ni la transformación en materiales que se vayan a usar como combustibles o para operaciones de relleno.
- Valorización: cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular, o que el residuo sea preparado para cumplir esa función, en la instalación o en la economía en general. En el anexo II de la DMR se recoge una lista no exhaustiva de operaciones de valorización, que incluye entre otras operaciones reciclaje.
- Eliminación: cualquier operación que no sea la valorización, incluso cuando la operación tenga como consecuencia secundaria el aprovechamiento de sustancias o energía. En el anexo I de la DMR se recoge una lista no exhaustiva de operaciones de eliminación.
- Listado LER: Lista Europea de Residuos, aprobada por Decisión 2000/532/CE, y transpuesta mediante Orden Ministerial MAM/304/2002. La inclusión de una sustancia, material o producto en la lista LER no le da la condición de residuo, salvo que cumpla estrictamente lo establecido en la DMR.

- Productor de residuos: cualquier persona cuya actividad produzca residuos (productor inicial de residuos) o cualquier persona que efectúe operaciones de tratamiento previo, de mezcla o de otro tipo que ocasionen un cambio de naturaleza o de composición de esos residuos.
- Poseedor de residuos: el productor de residuos o la persona física o jurídica que esté en posesión de residuos.
- Negociante: toda empresa que actúe por cuenta propia en la compra y posterior venta de residuos, incluidos los negociantes que no tomen posesión físicamente de los residuos.
- Agente: toda empresa que disponga la valorización o la eliminación de residuos por encargo de terceros, incluidos los agentes que no tomen posesión físicamente de los residuos.
- Gestión de residuos: la recogida, el transporte, la valorización y la eliminación de los residuos, incluida la vigilancia de estas operaciones, así como el mantenimiento posterior al cierre de los vertederos, incluidas las actuaciones realizadas en calidad de negociante o agente.
- Recogida: operación consistente en juntar residuos, incluida su clasificación y almacenamiento iniciales con el objeto de transportarlos a una instalación de tratamiento de residuos.
- RCD: Residuos de la Construcción y la Demolición, es cualquier sustancia u objeto que, cumpliendo la definición de "Residuo" incluida en el artículo 3.a) de la Ley 10/1998, de 21 de abril, se genere en una obra de construcción o demolición.
- Residuos inertes: son los que se producen en la obra fundamentalmente por la actividad de excavación y movimiento de tierras, son materiales sobrantes que de no utilizarse en la formación de terraplenes o rellenos es necesario depositar en vertedero autorizado. No presentan ningún riesgo de polución de las aguas, de los suelos y del aire, son compatibles con el medio ambiente. En el caso de los materiales procedentes de excavaciones (tierras), dadas sus características podrán ser reutilizados como rellenos en zonas localizadas.
- Los residuos de construcción y demolición deberán separarse en fracciones, cuando la cantidad prevista de generación para el total de la obra supere las cantidades de la tabla 1:

Material	Cantidad (toneladas)
Hormigón	80
Ladrillos, tejas, cerámicos	40
Metal	2
Madera	1
Vidrio	1
Plástico	0.5
Papel y cartón	0.5

Tabla 1. Fuente: RD105/2008.

2.2 Producción de baldosas, ladrillos y sanitarios

El sector de la cerámica se ha consolidado como uno de los principales sectores de España. Tiene una importancia singular para la economía española ya que se trata de una industria de origen y capital español, que ocupa una posición de liderazgo tanto en desarrollo tecnológico como en diseño y calidad en materiales y servicios. La industria conforma un clúster industrial con un enorme impacto económico, social y laboral en un reducido espacio geográfico, el distrito cerámico de la provincia de Castellón.

La década prodigiosa de la industria cerámica abarcó de 1993 a 2002 donde la producción se duplicó, superando los 650 millones de metros cuadrados el último año. Los datos más recientes de la producción mundial que se disponen son de 2012 (Tabla 2), y una evolución desde el año 2005 de los seis principales países productores de cerámica mundial (Tabla 3).

A continuación, se detalla la fabricación de cerámica a nivel mundial, los datos más recientes de los que se disponen son de 2012 y la comparación sobre 2011 (Tabla 2).

Fabricación mundial de cerámica			
Zonas	2012 (Millones m ²)	% Producción mundial	Variación % 12/11
Unión Europea (27)	1.168	10,5	-0,8
Resto de Europa (Turquía incluida)	532	4,8	+8,6
América del Norte (México incluida)	300	2,7	+4,2
Centro y Sud-América	1.138	10,2	+3,6
Asia	7.674	68,7	+6,4
África	349	3,1	+7,1
Oceanía	5	0,0	0,0
TOTAL	11.166	100	+5,4

(Tabla 2. Fuente: García Alcaraz, L.)

A continuación, se detalla la fabricación de cerámica de los seis principales productores de cerámica actualmente y la producción desde el año 2005 al 2012 de estos países (Tabla 3).

Principales países productores de cerámica (millones de m ²)								
Año	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
China	2500	3000	3200	3400	3600	4200	4800	5200
Brasil	568	594	637	713	715	753	844	866
India	298	340	385	390	490	550	617	691
Irán	190	210	250	320	350	400	475	500
España	609	608	585	495	324	366	392	404
Italia	570	569	559	513	368	387	400	367

(Tabla 3. Fuente: García Alcaraz, L.)

2.3 Residuos generados

La producción de RCD en España ha descendido progresivamente debido a la bajada generalizada del sector de la construcción con un descenso del 56% en el periodo 2009-2013.

En el año 2013, las entradas en plantas de gestores autorizados suponen un 38% de la producción, el 26% se deposita directamente en vertederos de inertes, la tendencia del vertido incontrolado es descendente situándose en un 36% de la producción. Esta reducción se debe al aumento de instalaciones de reciclaje y a la presión asociativa para un mayor control desde los ayuntamientos, ya que en el periodo 2009-2013 el vertido incontrolado suponía un 49% de la producción total de residuos.

En el año 2013 se estabiliza la producción de RCD por primera en el periodo con una estimación de producción de RCD en España de 20 millones de toneladas anuales y tendencia al alza debido a la leve recuperación del sector de la construcción.

Las obras de rehabilitación representan la tipología de obra con porcentaje más alto en la producción de RCD, en el año 2013 el 46% de todos los RCD generados proceden de obras de rehabilitación, un 21% de obras de ingeniería civil, un 18% de obras no residenciales, y un 15% de obras residenciales.

En la siguiente tabla se detallan las salidas de planta y el total reciclado de los residuos de construcción y demolición en España en el periodo de 2009 a 2013 de la producción total de residuos de construcción y demolición, según datos oficiales.

Producción de RCD Controlados (t)					
Año	Salidas planta			Total	Salidas planta
	Áridos Mat. Rec.	Relleno	MET. MAD. PL. AS.	Reciclado	Rechazos vertedero
2009	0	0	0	5.551.123	696.858
2010	0	324.829	0	6.092.306	805.099
2011	0	322.642	0	3.035.398	412.772
2012	104.838	249.239	81.483	3.207.964	451.818
2013	227.925	117.997	88.686	757.412	113.350
TOTAL	332.763	1.014.707	170.169	20.999.569	2.479.897

Tabla 4. Fuente: FERCD

En la siguiente tabla se detallan la producción y el destino de los residuos de construcción y demolición en España en el periodo de 2009 a 2013, de la producción total de residuos de construcción y demolición, así como el porcentaje de toneladas por habitante y año, según datos oficiales.

Producción de RCD Controlados (t)						
Año	Total producción	1. Plantas reciclaje RCD	2. R. Obra, otros gestores	3. Vertedero (incluido rechazos)	No especificado 1-2-3	T/hab/año
2009	20.375.965	6.247.981	0	1.496.585	12.631.399	0,44
2010	18.956.026	6.897.405	0	1.988.904	10.069.717	0,40
2011	15.223.594	3.448.170	0	1.242.908	10.532.515	0,32
2012	12.085.306	3.659.782	91.488	2.016.411	6.317.625	0,26
2013	12.818.181	870.761	116.744	282.084	11.548.592	0,27
TOTAL	79.459.072	21.124.100	208.232	7.026.892	51.099.848	0,34

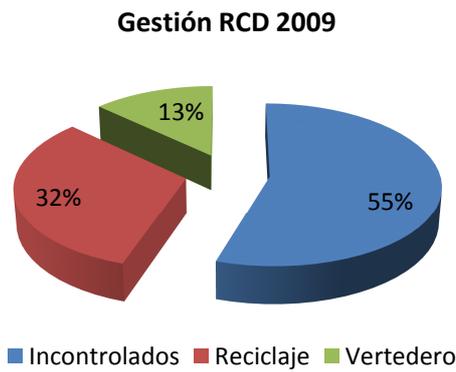
Tabla 5. Fuente: FERCD

En la siguiente tabla se expresan los datos de la gestión de residuos generados en el periodo de 2009 a 2013, separados en residuos controlados como, los reciclados y los depósitos al vertedero; y los residuos incontrolados, así como el total de ambos.

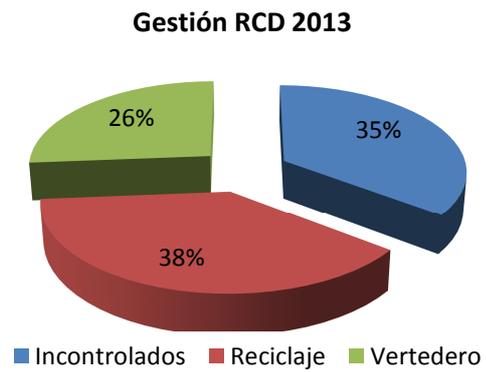
Gestión RCD 2009-2013 (t)						
Año	2009	2010	2011	2012	2013	Periodo
Reciclaje	14.603.106	12.995.937	9.850.543	6.323.032	7.647.071	51.419.688
Depósitos vertedero	5.772.859	5.960.088	5.373.051	5.762.275	5.171.110	28.039.384
RCD Incontrol.	25.329.970	18.860.150	14.206.109	9.373.265	7.367.528	75.137.023
TOTAL	45.705.936	37.816.176	29.429.702	21.458.572	20.185.709	154.596.095

Tabla 6. Fuente: FERCD

A continuación, mediante gráficas comparativas, se observa la evolución del tratamiento de los residuos de construcción y demolición en España en un periodo de 4 años, reduciendo considerablemente los residuos incontrolados, pero sin un aumento significativo del reciclaje.

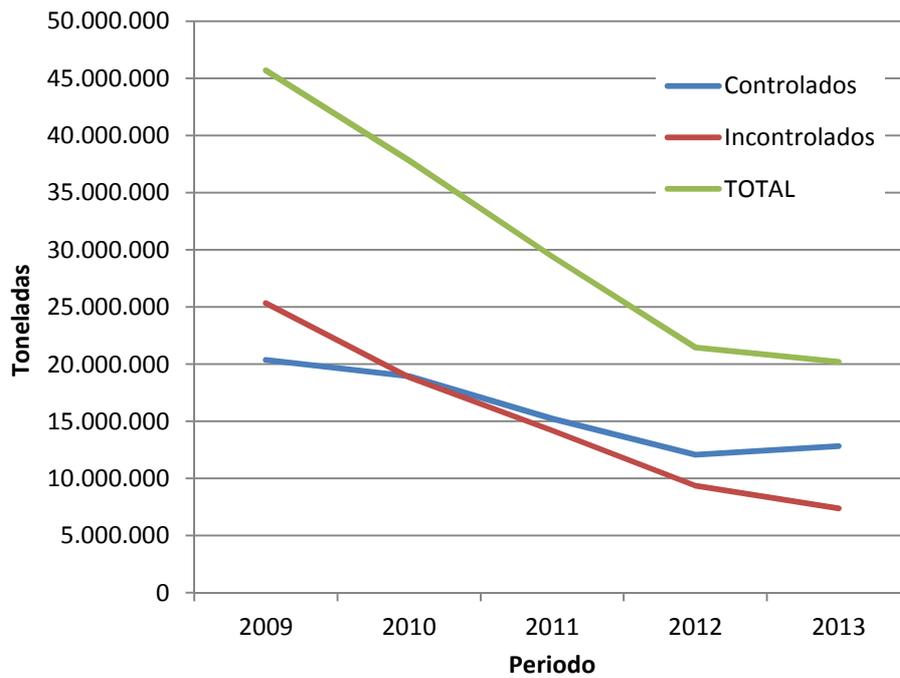


Gráfica 1. Fuente: FERCD



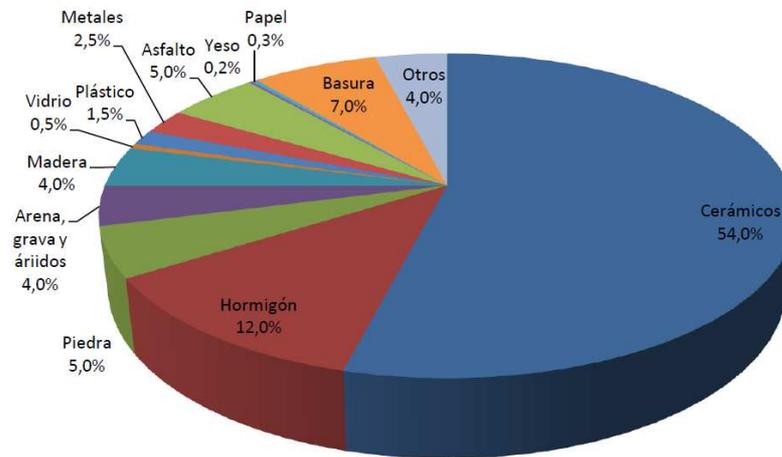
Gráfica 2. Fuente: FERCD

En la siguiente gráfica se comparan los residuos controlados y los incontrolados para ver la evolución de ambos, así como la suma de estos para observar el total de residuos generados.



Gráfica 3. Fuente: FERCD

En la siguiente gráfica se especifica el porcentaje obtenido de cada material, que se obtiene de los residuos de construcción y demolición en el año 2013, y más de la mitad pertenecen a residuos cerámicos.



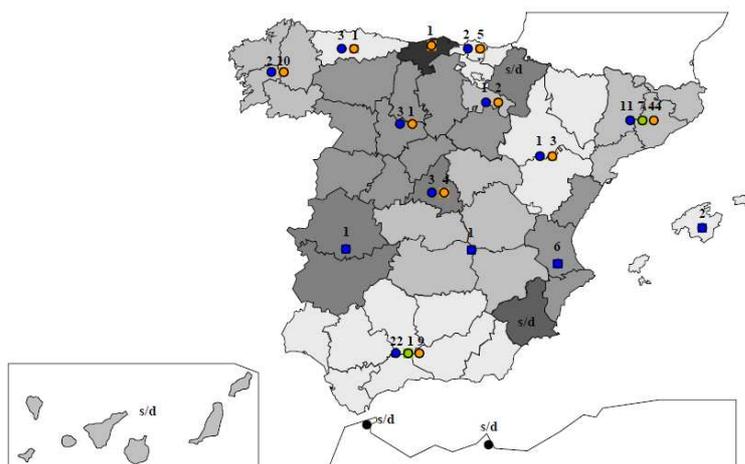
Gráfica 4. Fuente: FERCD

2.4 Plantas de reciclado

Las plantas de reciclado de RCD en España son escasas, en el siguiente mapa se reflejan por comunidades autónomas, el número de plantas de reciclado, número de estaciones de transferencia y número de vertederos controlados, los datos para la realización son del año 2010, actualmente el número de todos ellos ha aumentado, pero existen datos oficiales de ello.

LEYENDA

- N° de plantas de reciclado
- N° de estaciones de transferencia
- N° de vertederos controlados



Mapa 1. Fuente: CEDEX

En la siguiente tabla se detallan las plantas de RCD en España en el año 2010, existen tres comunidades de las que no se obtiene información fiable.

Plantas de RCD en España en 2010	
Comunidad Autónoma	Nº Plantas
Andalucía	22
Aragón	1
Asturias	3
Baleares	2
Canarias	s/d
Cantabria	0
Castilla la Mancha	1
Castilla y León	3
Cataluña	11
Comunidad Valenciana	6
Extremadura	1
Galicia	2
La Rioja	1
Madrid	3
Murcia	s/d
Navarra	s/d
País Vasco	2
TOTAL	58

Tabla 7. Fuente: CEDEX

Hay que diferenciar dos fases en el procesamiento de los RCD: la demolición y el reciclado de los materiales.

- Demolición: Si los escombros van a ser reciclados, conviene utilizar métodos de demolición que reduzcan in situ los escombros a tamaños que puedan ser tratados por el triturador primario de la planta de reciclaje (menores de 1200 mm en plantas fijas y de 400-700 mm para plantas móviles). Asimismo, los procesos de demolición selectiva son fundamentales para disminuir la presencia de impurezas en los escombros, por ejemplo el yeso.

- Reciclado, plantas de transferencia: Son instalaciones para el depósito temporal de residuos de construcción y demolición que han de ser tratados o eliminados en instalaciones localizadas a grandes distancias. A veces es posible realizar la separación y clasificación de las fracciones de los residuos con lo que se mejora la gestión en las plantas de valorización y depósitos controlados que constituyen su destino final.

Plantas de valorización: Son instalaciones de tratamiento de los residuos de construcción y demolición en las que se depositan, seleccionan, clasifican y valorizan las diferentes fracciones que contienen estos residuos, con el objetivo de obtener productos finales aptos para su utilización.

Las plantas de producción de áridos reciclados son bastante similares a las plantas de machaqueo de áridos naturales, incluyen machacadoras, cribas y dispositivos de transporte (cintas transportadoras, cangilones, etc.). Adicionalmente, disponen de equipos para la eliminación de contaminantes y electroimanes para la separación del acero.

La planta de tratamiento debe asegurar unas máximas distancias de transporte, es decir, situarse lo más cerca posible del centro de la ciudad donde se originan la mayoría de los residuos de la construcción y donde se da una más amplia demanda de los áridos reciclados. También se pueden habilitar vertederos temporales de residuos (plantas de transferencia) y pequeñas plantas móviles que pueden emplearse para un tratamiento primario de los residuos.

Los sistemas de procesamiento utilizados dependerán de la aplicación final que se le vaya a dar al material reciclado (material para relleno, para zahorras en firmes para carreteras u hormigón) y de la cantidad de impurezas que contenga.

Las plantas se pueden clasificar en:

- Plantas de 1ª generación: carecen de mecanismos de eliminación de contaminantes, a excepción del acero.

- Plantas de 2ª generación: añade al tipo anterior sistemas mecánicos o manuales de eliminación de contaminantes previos al machaqueo, y elementos de limpieza y clasificación del producto machacado, por vía seca o húmeda. Son las más extendidas en el reciclado del hormigón.

- Plantas de 3ª generación: dirigidas a una reutilización prácticamente integral de otros materiales secundarios, considerados como contaminantes de los áridos generados.

Además se puede realizar otra clasificación de las plantas según su capacidad de desplazamiento en: móviles, semimóviles y fijas.

Las plantas móviles están constituidas por maquinaria y equipos de reciclaje móviles que, aun disponiendo de una ubicación de referencia como almacén, suelen desplazarse a las obras para reciclar en origen. Utilizan un remolque de lecho plano como plataforma para el equipo de precibado, trituración, separación magnética y cribado final, junto con transportadoras, conductos y controles. Los sistemas se pueden montar en menos de un día mediante el despliegue de patas hidráulicas y la subida y alineación del equipo para conseguir un correcto flujo de materiales.

Pueden procesar hasta 100 toneladas a la hora, suponiendo que la alimentación sea del mismo tamaño y que se emplee la separación magnética y los sistemas de cribado. Estos equipos pueden procesar material con tamaño inferior a 700 mm, siendo necesarios la reducción del tamaño de los bloques mayores mediante martillos o cizallas hidráulicos.

Las plantas semimóviles, aunque también se entregan con camiones, son más grandes que las unidades móviles y se puede tardar hasta tres días en montarlas para su operación en un lugar determinado.

Las plantas fijas son instalaciones de reciclaje ubicadas en un emplazamiento fijo, con autorización administrativa para el reciclaje de RCD, cuya maquinaria de reciclaje (fundamentalmente los equipos de trituración) son fijos y no operan fuera del emplazamiento donde están ubicados. Se montan de una forma permanente y proporcionan la mayor gama de capacidad. Estas plantas son en líneas generales, similares a las empleadas para el machaqueo de áridos naturales, si bien incorporan de forma específica elementos para la separación de impurezas y otros contaminantes. Generalmente incluyen varios procesos de trituración y pueden procesar entre 300 y 400 toneladas por hora.

Una vez procesados los áridos se acopian en planta hasta su suministro. Para el caso particular de la producción de áridos de hormigón este acopio debe realizarse teniendo en cuenta que se deben almacenar por separado los áridos gruesos reciclados y los áridos finos reciclados.

2.5 Comparativa europea en gestión de residuos

En el marco de la Estrategia 2020, “la Hoja de ruta hacia una Europa Eficiente en el uso de los recursos” recoge los objetivos y los medios para transformar la economía actual, basada en el uso intensivo de los recursos, en un nuevo modelo de crecimiento basado en el uso eficiente de los recursos.

El objetivo es convertir a Europa en una sociedad eficiente en el uso de los recursos, que produzca menos residuos y que utilice como recurso, siempre que sea posible, los que no pueden ser evitados, avanzando así hacia la “Sociedad del Reciclado”, que menciona la Directiva Marco de residuos (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). El objetivo es pues conseguir niveles de reciclado mucho más altos minimizando la extracción de recursos naturales adicionales. La prevención y el reciclado son por tanto los elementos claves de la nueva política de residuos para convertir a Europa en una sociedad eficiente en el uso de los recursos, en un contexto de materias primas cada vez más escasas y caras.

En la siguiente tabla se muestra más detalladamente, los principales países de la Unión Europea en el año 2011, el número aproximado de instalaciones de trituración y clasificación de residuos de construcción y demolición, así como un breve comentario sobre sus características técnicas.

Instalaciones de trituración y clasificación de RCD en la UE, año 2011		
País	Nº Aprox.	Observaciones
Alemania	1000	La cantidad de RCD reciclados se estima en 8 Mt/año. La producción actual se sitúa en unas 40.000 t/año.
Austria	150	La capacidad total es de 5 Mt/año y la producción típica 20.000 t/año. El número de máquinas de trituración fijas/móviles es de 2/1.
Bélgica	92	80 máquinas de trituración/recicladoras con una capacidad de 5 Mt/año y 40 plantas de separación en Flandes. 12 plantas de reciclaje en Valonia con una capacidad de 0,9 Mt/año.
Dinamarca	30	Capacidad total de trituración de 3 Mt/año, con una producción típica de 100.000 t/año. El número de máquinas de trituración fijas/móviles es de 2/1.
España	10	Plantas móviles trabajando "in situ" con capacidades desconocidas.
Finlandia	10	Se refiere a instalaciones de recogida de hormigón/obra de fábrica. El número de fijas/móviles es desconocido.
Francia	50	Se refiere a centros fijos. La capacidad total se estima en 5 Mt/año, produciendo una media de 100.000 t/año por máquina de trituración.
Grecia	-	No se recibieron datos de Grecia.
Holanda	120	Unas 20 están en los emplazamientos de construcción y las 100 restantes en centros fijos de reciclaje de RCD. Capacidad total en torno a 1.625 Mt/año y capacidad específica media alrededor de 135.000 t/año.
Irlanda	<8	6 móviles y 2 fijas en preparación.
Italia	60-100	El número de recicladores especializados en RCD con plantas fijas se estima que no supera los 10. El resto, 50-100, son pequeñas máquinas de trituración móviles.
Luxemburgo	-	No se recibieron datos de Luxemburgo.
Reino Unido	50-100	Existen más de 360 máquinas de trituración con licencia, pero esta cifra incluye todas las máquinas de trituración operando en canteras. Bajo estos supuestos, las máquinas de trituración típicas de RCD presentan una producción de entre 40-80.000 t/año.
Total UE	1500	Capacidad típica de 100.000 t/año por máquina de trituración, pero las máquinas están operando por debajo de estos niveles.

Tabla 8. Fuente: CONAMA-EIMA

En esta tabla se comparan los principales países de la Unión Europea, los kilos de residuos generados en función de cada habitante y año, además del porcentaje de residuo que es reciclado.

Residuos y reciclado en la Unión Europea, año 2011		
País	Kg/Hab/año	% reciclaje
Alemania	720	35,00
Francia	720	18,00
Reino Unido	730	45,00
Italia	450	15,00
España	450	20,00
Polonia	350	5,00
Holanda	730	90,00
Bélgica	600	87,00
Austria	650	41,00
Romania	250	5,00
Portugal	300	6,00
Republica Checa	250	5,00
Hungría	250	5,00
Suecia	250	21,00
Grecia	200	5,00
Dinamarca	400	81,00
Irlanda	300	12,00
Luxemburgo	200	12,00

Tabla 9. Fuente: CONAMA-EIMA

2.6 Normativa aplicable de gestión de residuos

La normativa es un punto muy importante en la evolución hacia un objetivo de convertir Europa en un continente más eficiente y eficaz, para ello en los últimos años se ha creado mucha más normativa, ya que antes no se contemplaba el revalorizar los residuos de construcción y demolición, en gran objetivo de la Directiva Europea de Residuos es que en año 2020, un 70% de los RCD deben valorizarse correctamente. A continuación se citaran la normativa Europea y estatal actualmente en vigor:

NORMATIVA EUROPEA

- Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.
- Reglamento 1013/2006, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 14 de junio, relativo a los traslados de los residuos. (DOCE nºL190/1, de 12 de julio de 2006.
- VII PMA. Programa General de Acción de la Unión en materia de Medio Ambiente hasta 2020.
- Decisión 2003/33/CE, de 19 de diciembre. Establece los criterios y procedimientos específicos de admisión de residuos en los vertederos.
- 2000/532/CE por la que se establece una lista de residuos. Regula la Lista Europea de Residuos (LER) e identifica las categorías de residuos que se consideran peligrosos.
- Directiva 1999/31/CE relativa al vertido de residuos. Regula el vertido de residuos y establece criterios de admisión de residuos y tipos de vertederos, entre los que están los de residuos inertes.

NORMATIVA ESTATAL

- Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos. Regula múltiples aspectos de la producción, gestión, seguimiento y control de residuos. Establece el contenido de los planes nacionales de residuos y su revisión cada 4 años.
- Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre. Establece el marco jurídico y técnico para las actividades de eliminación de residuos mediante depósito en vertederos, al tiempo que regula las características de éstos así como su correcta gestión y explotación. Establece requisitos específicos que han de cumplir los vertederos de residuos inertes.
- Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero. Publica las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la vigente Lista Europea de Residuos (LER).
- Real Decreto 105/2008, 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición.

- Real Decreto 1304/2009, de 31 de julio, por el que se modifica el Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante el depósito en vertedero.
- LEY 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.
- Ley 5/2013, de 11 de junio, por la que se modifican la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación y la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. BOE nº 140, de 12 de junio.
- Orden AAA/661/2013, de 18 de abril, por la que se modifican los anexos I, II y III del Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. BOE nº 97, de 23 de abril.
- PNIR 2007-2015. Fija los principios de gestión, objetivos específicos de reducción, reutilización, reciclado y eliminación. Establece las medidas a adoptar para conseguir dichos objetivos, los medios de financiación y el procedimiento de revisión.
- Programa estatal de prevención de residuos 2014-2020.

2.7 Normativa aplicable para hormigones con áridos reciclados

Para la realización de hormigones estructurales con árido reciclado, la única normativa existente es la EHE-08, en la que para los hormigones reciclados apenas los contempla, salvo en el anejo 15 en el que da recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados.

La EHE-08 en el anejo 15 cita textualmente *“Se define a los efectos de este Anejo como hormigón reciclado, el hormigón fabricado con árido grueso reciclado procedente del machaqueo de residuos de hormigón. Para su aplicación en hormigón estructural, este Anejo recomienda limitar el contenido de árido grueso reciclado al 20% en peso sobre el contenido total de árido grueso. Con esta limitación, las propiedades finales del hormigón reciclado apenas se ven afectadas en relación a las que presenta un hormigón convencional, siendo necesaria, para porcentajes superiores, la realización de estudios específicos y experimentación complementaria en cada aplicación. Quedan fuera de los objetivos de este Anejo:*

- *Los hormigones fabricados con árido fino reciclado.*
- *Los hormigones fabricados con áridos reciclados de naturaleza distinta del hormigón (áridos mayoritariamente cerámicos, asfálticos, etc.).”*

Por lo tanto los porcentajes utilizados y los tres residuos escogidos en este estudio no cumplen la EHE-08, aun así, ya que nuestro hormigón estructural es reciclado a pesar de no estar en los parámetros antes mencionados, tomaremos esta normativa como referencia para llevar a cabo el análisis de los materiales y hormigón reciclado.

Analizando el anejo 15 de la EHE-08, se han extraído los aspectos más importantes para la realización de este estudio, y si cada residuo por separado cumplía o no el artículo, se reflejan en la siguiente tabla:

Anejo 15, EHE-08				
Artículo	Observaciones	Cumple		
		BAL	LH	SAN
28.1	La combinación de árido grueso natural y reciclado ha de satisfacer las especificaciones recogidas en el Artículo 28 de la Instrucción.	No	No	No
28.1	Las partidas de árido reciclado deben disponer de un documento de identificación de los escombros de origen.	Si	Si	Si
28.3	El tamaño mínimo permitido de árido reciclado es de 4 mm.	No	No	No
28.4	Los áridos reciclados deberán presentar un contenido de desclasificados inferiores menor o igual al 10% y un contenido de partículas que pasan por el tamiz de 4 mm no superior al 5%.	No	No	No
28.6	Si el hormigón reciclado incorpora cantidades de árido reciclado superiores al 20%, habrá que extremar las precauciones durante su producción para eliminar al máximo las impurezas de tierras que lleve la materia prima, y así facilitar que el árido combinado cumpla la especificación de la Instrucción.	Si	Si	Si
28.6.1	Para la resistencia al desgaste de la grava se mantiene el mismo requisito que para los áridos naturales (coeficiente de Los Ángeles no superior al 40%).	Si	No	Si
28.6.1	En hormigones reciclados con más del 20% de árido reciclado, la combinación de árido grueso natural y reciclado debería cumplir un coeficiente de absorción no superior al 5%.	Si	No	Si
28.6.1	Como control rápido en la planta de producción, que permita estimar la absorción del árido reciclado, se puede realizar un ensayo de absorción a los 10 minutos, que debería ser inferior al 5,5%.	No	No	Si
28.7	Se deberá controlar en el árido reciclado el contenido de impurezas, estableciendo los valores máximos recogidos en la tabla A15.1: (Material cerámico 5%)	No	No	No
29	En hormigones reciclados con sustitución mayor al 20%, la utilización de aditivos que modifiquen la reología es recomendable para la mejora de la trabajabilidad, compensando la mayor absorción de agua del árido reciclado si éste se utiliza en estado seco.	Si	Si	Si
37.3.7	El árido reciclado debe cumplir las especificaciones que recoge el articulado relativo al coeficiente de Los Ángeles, que debe ser inferior al 30%.	Si	No	Si
79.3.1	La mayor heterogeneidad que suelen presentar los áridos reciclados, hace necesario un mayor control de sus propiedades, especialmente las más desfavorables en este tipo de áridos, como son su absorción, contenido de finos, contenido de impurezas, etc.	Si	Si	Si
A22.2	Se deben llevar a cabo los ensayos característicos para comprobar las posibles variaciones en los resultados de consistencia y resistencia del hormigón.	Si	Si	Si

Tabla 10. Fuente: EHE-08

2.8 Conclusiones

Para España el gran objetivo es cumplir en el año 2020 con la Directiva Europea de Residuos, que especifica que un 70% de los RCD deben valorizarse correctamente. España como se ve en las estadísticas en los últimos años ha mejorado bastante sobre el tratamiento de RCD, pero aún está muy lejos de poder cumplir este objetivo.

La normativa estatal sobre residuos va cambiando con frecuencia siendo cada vez más estricta, hay menos residuos sin controlar, aunque debe de mejorar más la normativa. La normativa para utilizar residuos en hormigón estructural es muy escasa, solo existe el anejo 15 de la EHE-08, en la que permite modificar un 20% del árido grueso, aproximadamente un 7% del árido total, eso es algo insignificante, ya que en este sentido no se pueden casi valorizar los residuos.

Para valorizar más los recursos mediante el hormigón estructural, debería existir una normativa más ágil, y unos residuos más estandarizados desde las plantas de tratamiento para agilizar el proceso de utilización de los residuos.

“Sin humildad, esfuerzo y pasión no posees alma, y sin alma nunca encontraras el verdadero camino.”

3. DESCRIPCIÓN MATERIALES UTILIZADOS

3.1 Introducción

El hormigón es el producto resultante de la mezcla de un conglomerante (cemento), un árido fino (arena), un árido grueso (grava) y agua. También se puede considerar como elementos que conforman el hormigón las adiciones o aditivos. Por lo tanto se puede definir como: Un conglomerado artificial.

Los métodos de dosificación de hormigones tienen por finalidad encontrar las proporciones en que hay que mezclar a los diferentes componentes de los mismos para conseguir mezclas que posean determinadas características de consistencia, compacidad, resistencia, durabilidad, etc.

Dado que ningún método contempla todos los factores que pueden influir en las características del hormigón, siempre es interesante comprobar la dosificación obtenida mediante ensayos previos del hormigón.

No existe un método único de dosificación sino que dependiendo de las condiciones que deba reunir el hormigón, y de las características de los propios componentes del mismo, el proyectista podrá elegir uno entre varios de los muchos existentes y los resultados que se consigan con él serán buenos cuando éste se haya elegido convenientemente y se hayan realizado las correcciones oportunas, después de hacer masas de prueba.

Los métodos de dosificación pueden dividirse en dos grupos fundamentales, uno formado por los que tienen como dato principal de partida la dosificación del cemento, teniendo además en cuenta otras características como puede ser la consistencia, tamaño máximo del árido a emplear, tipos de áridos, aire ocluido en determinadas proporciones, clase de ambiente, etc., y otro formado por los que se basan en las resistencias mecánicas del hormigón, especialmente la de compresión y a la que deben acompañar otros datos como los indicados anteriormente para los hormigones definidos por su dosificación de cemento.

Aunque un hormigón se haya dosificado teniendo en cuenta una cantidad dada de cemento, se puede conocer la resistencia a compresión probable que puede proporcionar ya que ésta está relacionada con la cantidad de cemento empleada, tipo y clase resistente de éste, relación agua/cemento, tipo y tamaño máximo del árido utilizado, etc.

Los tres métodos de dosificación tradicionales son el de Fuller, el de Bolomey y el de Carlos de la Peña; los dos primeros partes del contenido de cemento, mientras que el último de la resistencia del hormigón. La aplicación de uno u otro depende del caso concreto planteado, siendo, siendo, por otra parte, cada uno de ellos una perfección del anterior. Los tres métodos emplean granulometrías continuas existiendo otros métodos más modernos que permiten la dosificación con granulometrías discontinuas (Pitarch, A. 2000).

3.2 Agua

El agua de amasado juega un doble papel en el hormigón. Por un lado, participa en las reacciones de hidratación del cemento; por otro, confiere al hormigón la trabajabilidad necesaria para una correcta puesta en obra (Jiménez Montoya, 1991).

La Instrucción del hormigón EHE 08 con respecto al agua de amasado indica que, salvo justificación especial de que no alteran perjudicialmente las propiedades exigibles al hormigón, deberán rechazarse las aguas que no cumplan una o varias de las siguientes condiciones:

Condiciones mínimas del agua	
PH	≥5
Sustancias disueltas	≤125 g/l (15000p.p.m.)
Sulfatos expresados en SO ₄	≤1 g/l (1000p.p.m.)
Ion cloro para hormigón pretensado	≤1 g/l (1000p.p.m.)
Ion para hormigón armado	≤3 g/l (1000p.p.m.)
Hidratos de carbono	0
Sustancias orgánicas solubles en éter	≤15 g/l (15000p.p.m.)

Tabla 11. Fuente: EHE-08

La Instrucción española del hormigón prohíbe la utilización de agua de mar, tanto en el amasado como en el curado del hormigón, salvo que mediante estudios adecuados se demuestre que no existe riesgo de corrosión.

3.3 Cemento (CEM II/A-V)

El cemento es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que, cuando es amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua.

El cemento debe ser capaz, cuando se dosifica y mezcla apropiadamente con áridos y agua, de producir un hormigón o un mortero que conserve su trabajabilidad durante un tiempo suficiente y de alcanzar, después de unos periodos definidos, los niveles especificados de resistencia. También debe tener estabilidad de volumen a largo plazo.

El endurecimiento hidráulico del cemento se debe principalmente a la hidratación de los silicatos de calcio, aunque también pueden participar en el proceso de endurecimiento otros compuestos químicos, como por ejemplo, los aluminatos. La suma de las proporciones de óxido de calcio reactivo (CaO) y de dióxido de silicio reactivo (SiO₂) en el cemento debe ser al menos del 50% en masa, cuando las proporciones se determinen de acuerdo con la Norma EN 196-2.

Los cementos están constituidos por diferentes materiales y son, en composición, estadísticamente homogéneos como consecuencia de los procesos de producción y manipulación de material con una calidad asegurada. La relación entre estos procesos de producción y manipulación del material y la conformidad del cemento con esta norma se establece en la Norma EN 197-2.

El componente principal del cemento Portland es el clínker, se obtiene por sinterización de una mezcla especificada con precisión de materias primas (crudo, harina o pasta) conteniendo elementos, normalmente expresados en forma de óxidos, CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, y pequeñas cantidades de otros materiales. El crudo, harina o pasta, se divide finamente y se mezcla íntimamente para obtener un producto homogéneo.

El clínker de cemento Portland es un material hidráulico que debe estar constituido, al menos en dos tercios de su masa, por silicatos de calcio (3CaO·SiO₂ y 2CaO·SiO₂), estando constituido el resto por fases del clínker conteniendo aluminio y hierro y por otros compuestos. La relación en masa (CaO) / (SiO₂) no debe ser menor de 2,0. El contenido de óxido de magnesio (MgO) no debe exceder del 5,0% en masa.

Además del clínker al ser un cemento tipo II/A-V R, tiene una alta resistencia inicial y está constituido por clínker portland (80 a 94%), cenizas volantes (6 a 20%) y otros constituyentes (0 a 5%). (Fernández Cánovas, 2004). Está compuesto por una adición de ceniza volante silíceo, está se obtiene por precipitación electrostática o mecánica de partículas pulverulentas arrastradas por los flujos gaseosos de hornos alimentados con carbón pulverizado.

La ceniza obtenida por otros métodos no debe emplearse en los cementos que son conformes con esta norma. La ceniza volante puede ser de naturaleza silíceo o calcárea. La primera tiene propiedades puzolánicas; la segunda puede tener, además, propiedades hidráulicas. La pérdida por calcinación de la ceniza volante determinada de acuerdo con la Norma EN 196-2, pero

empleando un tiempo de calcinación de 1 h, se debe encontrar dentro de alguno de los siguientes límites: a) 0% a 5,0% en masa; b) 2,0% a 7,0% en masa; c) 4,0% a 9,0% en masa.

La ceniza volante silíceo es un polvo fino, de partículas esféricas en su mayoría, que tiene propiedades puzolánicas. Consta esencialmente de dióxido de silicio reactivo (SiO_2) y de óxido de aluminio (Al_2O_3). El resto contiene óxido de hierro (Fe_2O_3) y otros compuestos.

La proporción de óxido de calcio reactivo (CaO) debe ser menor del 10,0% en masa, y el contenido de óxido de calcio libre, determinado según el método descrito en la Norma EN 451-1, no debe exceder del 1,0% en masa. También es aceptable la ceniza volante con un contenido de óxido de calcio libre superior al 1,0% en masa pero inferior al 2,5% en masa, con la condición de que el requisito de expansión (estabilidad de volumen) no sobrepase los 10 mm cuando se ensaye de acuerdo con la Norma EN 196-3, utilizando una mezcla de un 30% en masa de ceniza volante silíceo y un 70% en masa de un cemento. El contenido de dióxido de silicio reactivo no debe ser inferior al 25% en masa (UNE EN 197-1).

El esquema del método de fabricación ha sido facilitado por el fabricante (Fig. 7). Tal como se observa, en la imagen el yeso y la caliza están en planta, en cambio el Clinker al contaminar tanto al producirlo, éste es importado desde otras fábricas en camión, el material pasa por unos domos, unos filtros, molinillo y separación, hasta el consumidor final.

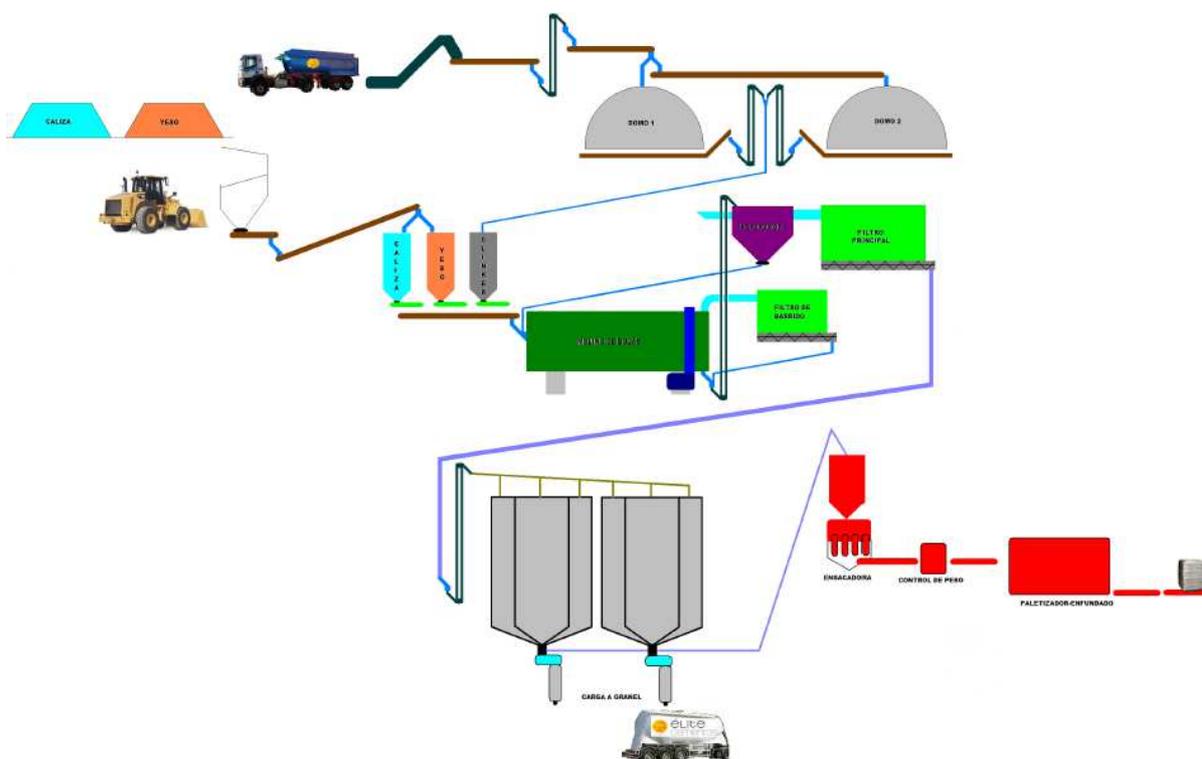


Fig. 7. Fuente: Cementos Élite

3.4 Aditivo (SKM 230)

El aditivo utilizado en el estudio, es un producto de la empresa Sika, en concreto el Sikament 230 (SKM 230), todas las características aquí reflejadas han sido proporcionadas por el fabricante. Dosificación aconsejada por el fabricante oscila entre el 0.3 y el 1% del peso del cemento en función de la consistencia o reducción de agua que se pretenda conseguir del hormigón.

El SKM 230 es un aditivo reductor de agua plastificante, especialmente formulado para la fabricación de hormigones en plantas de hormigón preparado y plantas de obra. No contiene cloruros y no ejerce ninguna acción corrosiva sobre las armaduras.

Como características más relevantes del aditivo SKM 230, son que nos permite incrementar las resistencias mecánicas, proporciona alta calidad en el acabado superficial de los hormigones, debido a la fluidez que proporciona, se mejora la adherencia a las armaduras, mejora la impermeabilidad y la manejabilidad; facilitando la puesta en obra del hormigón.

El SKM 230 cumple con las especificaciones de la Norma UNE EN 934-2: Tabla 2: reductor de agua/plastificante. El aditivo se encuentra en estado líquido, tiene un tono de color marrón, con una base química polimérica y con una densidad de 1.07 Kg/l.

El fabricante recomienda la adicción del aditivo al agua de amasado antes de ser mezclado con el hormigón. Si no fuera posible, puede añadirse al hormigón ya preparado, realizando seguidamente un reamasado de, al menos 1 minuto por m³ de hormigón. Deben seguirse las normas de buen uso del hormigón, en lo que se refiere a la fabricación y a la aplicación. El hormigón fresco debe ser curado correctamente tan pronto como sea posible.

3.5 Árido natural calizo

Dentro de los materiales conglomerados, y especialmente en el caso del hormigón, los áridos cobran una vital importancia, puesto que ocupan entre el 60 y el 75% del volumen del hormigón endurecido y entre el 70 y el 85% del peso, siendo a su vez uno de los componentes más baratos del mismo.

Los áridos tienen una función física absorbiendo y transmitiendo las cargas y disminuyendo las retracciones, también nos puede economizar consiguiendo menores cantidades de cemento.

Los áridos se dosificarán en peso, teniendo en cuenta las correcciones por humedad.

Como ya se ha indicado el tamaño máximo de los áridos vendrá condicionado por los espacios por los que deberá pasar el hormigón.

La naturaleza de los áridos y su preparación serán tales que permitan garantizar la adecuada resistencia y durabilidad del hormigón. Siendo los áridos normalmente utilizados: las arenas o gravas naturales o las rocas machacadas o trituradas.

La calidad del árido también va a influir en las características del hormigón resultante. Por ello utilizaremos áridos: Que proporcionen las resistencias requeridas; Que proporcionen durabilidad; Tamaños apropiados; Que no produzcan reacciones no deseadas con el resto de componentes; Que no contengan sustancias que nos provoquen corrosión a las armaduras.

A tal efecto, la EHE, establece las cantidades máximas admisibles de algunas de las sustancias perjudiciales.

Así mismo el contenido de finos (árido menor a 0.063 mm) que contengan los áridos también influirá en el comportamiento del hormigón. Por ello la EHE limita el contenido de finos de los áridos en función de la naturaleza y del ambiente en el que vaya a ser utilizado.

Dichas limitaciones permiten un contenido de finos de hasta un 15% cuando se trata de un árido calizo de machaqueo (con poca probabilidad que los finos sean arcillosos) en un ambiente I, IIa y IIb.

En cuanto a la granulometría del árido, más allá del tamaño máximo del árido y de las posibles impurezas, deberemos conseguir la proporción adecuada de los distintos tipos de tamaño para obtener la mayor ocupación de huecos consiguiendo una gran compacidad aumentando las resistencias mecánicas. También conseguiremos una disminución de las retracciones.

En el caso de los finos tenemos la limitación anterior debido a la gran reducción de resistencia que nos va a conllevar y su menor durabilidad si se hace un mal uso de éste (Pitarch, A. 2000).

3.6 Residuos utilizados

3.6.1 Introducción

Los residuos utilizados tienen en común que todos tienen la misma materia prima, la cerámica. La cerámica es uno de los primeros materiales artificiales fabricados por el hombre, su origen se remonta a las civilizaciones más antiguas. Básicamente la cerámica está compuesta por cuatro elementos, tierra, agua, aire y fuego, variando la elaboración de la cerámica podemos encontrar materiales diversos con características muy diferentes.

El proceso cerámico consta fundamentalmente de cinco etapas (Fig. 8): 1) la selección y preparación de las materias primas, 2) la preparación del cuerpo cerámico, que consiste en la preparación de la mezcla, homogenización y amasado, 3) el moldeado, que puede hacerse por varios procedimientos, 4) el secado, y 5) la cocción. Como resultado de todo ello se obtiene el producto cerámico, que deberá pasar controles de calidad. Todas las etapas son importantes, pero es sin duda la cocción la más crítica e interesante, tanto desde un punto de vista básico, por cuanto supone un conjunto de reacciones del mayor interés científico, como aplicado porque en esta etapa se consigue realmente el producto cerámico final (Galán, E; Aparicio, P; 2006).

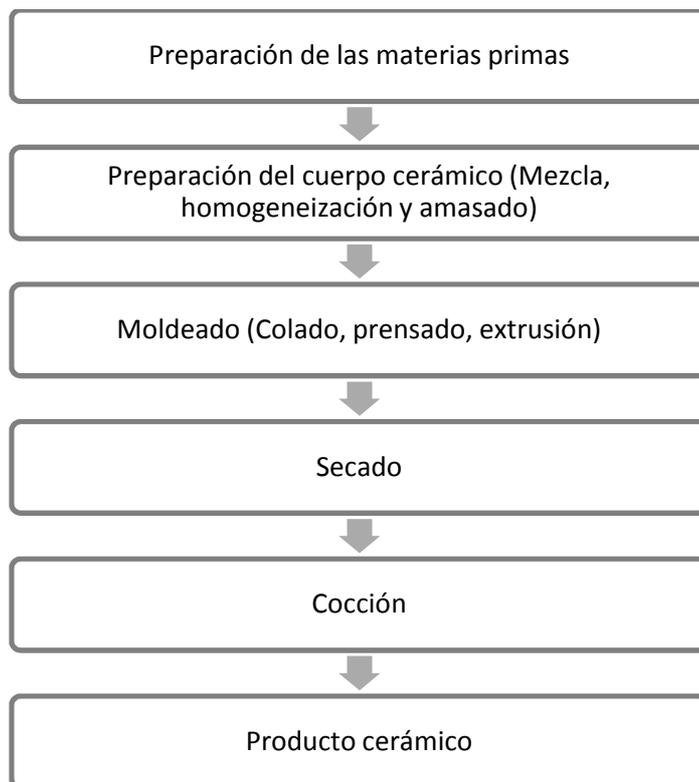


Fig. 8. Fuente: Galán, E; Aparicio, P.

En la siguiente tabla, adaptada de la referencia (Enrique y Amorós, 1985), se detalla una clasificación de los materiales cerámicos.

Tipo de material cerámico	Recubrimiento	Color de la pasta	Clase de cerámica	Campo de aplicación	Rango de cocción	Materia prima
poroso	Sin esmalte	Pasta coloreada	Cerámica estructural	Ladrillos y teja	900-1000°C	Margas calcáreas, margas arcillosas, arcillas calcáreo-ferruginosas
		Pasta blanca	Loza	Ladrillos para la construcción de hornos y filtros depuradores	1200-1250°C	Arcillas blancas (arcillas caoliníferas)
	Con esmalte	Pasta coloreada	Mayólica	Pavimentos y revestimientos cerámicos	920-980°C	arcillas calcáreas y ferruginosas
		Pasta blanca	Loza	Ladrillos para pavimentación y revestimiento	1250-1280°C	Arcillas blancas con feldespato, cuarzo y carbonatos
No poroso	Sin esmalte	Pasta coloreada	Gres	Pavimento de gres rojo	950-1100°C	Arcillas blancas con cuarzo y feldespato
		Pasta coloreada	Gres	Pavimentos	1100-1300°C	Arcillas blancas con cuarzo y feldespato
	Con esmalte	Pasta blanca	Porcelana	Aparatos sanitarios	1200-1300°C	Arcillas caoliníferas con cuarzo y feldespatos. Materiales fosfáticos y cordieríticos

Tabla. 12. Fuente: Enrique y Amorós

3.6.2 Mezcla baldosas cerámicas

El residuo de baldosas en una mezcla de todo tipo de baldosas, por lo tanto no se especificara ninguna en concreto, sino de forma general. En la composición de las baldosas cerámicas entran arcillas, sílices, fundentes, colorantes y otros materiales con los cuales se elaboran las mismas en forma de placas de poco espesor y se las utiliza como revestimientos para pavimentos y paramentos.

Las baldosas cerámicas se fabrican en primer lugar mediante el molido, luego se realiza el tamizado, amasado y la humificación.

A continuación se moldean por prensado, extrusión, colado u otros procedimientos, por lo general este proceso se realiza a temperatura ambiente.

Luego secadas y seguidamente se cuecen en hornos a altas temperaturas, entre 950 y 1300 grados.

El acabado de las baldosas, las hay esmaltadas, no esmaltadas y engobadas; en cualquier tipo y formato, todas son incombustibles e inalterables a la radiación solar.

El esmalte tiene un acabado vitrificado e impermeable, y el engobe posee una cubierta a base de arcilla con un acabado mate y superficie permeable o impermeable.

3.6.3 Ladrillo hueco de pasta roja

La materia prima utilizada para la producción de ladrillos es, fundamentalmente, la arcilla. Este material está compuesto, en esencia, de sílice, alúmina, agua y cantidades variables de óxidos de hierro y otros materiales alcalinos, como los óxidos de calcio y los óxidos de magnesio.

Las partículas del material son capaces de absorber higroscópicamente hasta un 70 % de su peso en agua. Cuando está hidratada, la arcilla adquiere la plasticidad suficiente para ser moldeada, a diferencia de cuando está seca; estado en el que presenta un aspecto terroso.

Durante la fase de endurecimiento, por secado o por cocción, el material arcilloso adquiere características de notable solidez, y experimenta una disminución de masa, por pérdida de agua, de entre un 5 y un 15 %.

Antes de incorporar la arcilla al ciclo de producción hay que someterla a ciertos tratamientos de trituración, homogeneización y reposo en acopio, con la finalidad de obtener una adecuada consistencia y uniformidad de las características físicas y químicas deseadas.

Antes de llegar a la operación de moldeo, se saca la arcilla de los silos y se lleva a un laminador refinador, y posteriormente a un mezclador para humedecer, donde se agrega agua para obtener la humedad precisa.

El moldeo consiste en hacer pasar la mezcla de arcilla a través de una boquilla al final de la estructura. La boquilla es una plancha perforada que tiene la forma del objeto que se quiere producir. El moldeo se suele hacer en caliente utilizando vapor saturado aproximadamente a 130 °C y a presión reducida. Procediendo de esta manera se obtiene una humedad más uniforme y una masa más compacta, puesto que el vapor tiene un mayor poder de penetración que el agua.

El secado es una de las fases más delicadas del proceso de producción. De esta etapa depende, en gran parte, el buen resultado y calidad del material, más que nada en lo que respecta a la ausencia de fisuras. El secado tiene la finalidad de eliminar el agua agregada en la fase de moldeo para poder pasar a la fase de cocción.

Se realiza en hornos de túnel, que en algunos casos pueden llegar a medir hasta 120 m de longitud, y donde la temperatura de la zona de cocción oscila entre 900 °C y 1000 °C. Es durante la cocción cuando se produce la sinterización, de manera que la cocción resulta una de las instancias cruciales del proceso en lo que a la resistencia del ladrillo respecta.

3.6.4 Productos de cerámica sanitaria

La porcelana es un material importado procedente de China y Japón a mediados del siglo XVII. Se pueden distinguir tres tipos de porcelanas, la porcelana dura, porcelana blanda y porcelana sanitaria, esta última es la utilizada en este estudio. La porcelana sanitaria destinada a la elaboración de aparatos sanitarios: lavabos, bidés, inodoros, platos de ducha o urinarios. La composición del bizcocho será de:

- Caolín 26%
- Arcilla 18%
- Cuarzo 30%
- Feldespato 18%
- Otros 8%

Se moldea por colada mediante moldes y se cuece hasta temperaturas de 1300°C, se esmalta con la coloración deseable, generalmente solo se esmalta la parte vista y se cuece nuevamente.

3.7 Conclusiones

En este apartado se han analizado cada uno de los componentes que van a formar el hormigón estructural reciclado. Se observa que todos los residuos tienen en mayor o menor porcentaje la arcilla como materia prima, pero el producto final es diferente en los tres casos. Estas diferencias se deben en mayor parte a que el proceso de fabricación es el mismo pero cambia la forma de moldearlos y principalmente los grados de cocción.

Es muy importante para un buen resultado del hormigón una correcta dosificación, y una buena adherencia de todos los materiales utilizados entre sí para un correcto funcionamiento.

“Cuanto más vivo, más aprendo. Cuanto más aprendo, más cuenta me doy de lo poco que se.” (Michel Legrand)

4. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS ÁRIDOS UTILIZADOS

Se han analizado los áridos calizos naturales y los tres residuos utilizados en la dosificación del hormigón, para así poder comparar todas sus características físicas, y poder llevar a cabo una planificación más exhaustiva de los ensayos, además de una mejor interpretación de los resultados obtenidos.

Los materiales ensayados son cuatro, el árido natural procede de la cantera Origen de Castellón, los residuos como los ladrillos huecos y el sanitario han sido adquiridos en fábricas de Castellón y por último el residuo de baldosas que es el resultado de una mezcla de baldosas de diferentes tipos y características, son procedentes de fábricas de Onda. Actualmente, la mezcla de residuos de baldosas mencionada, se utiliza para la fabricación de bloques de hormigón.

4.1 Tamizado de los residuos utilizados

4.1.1 Procedimiento

El ensayo se realizó según la norma UNE EN 933-1:2012.

En primer lugar, la muestra debe estar completamente seca, se debe introducir en una estufa a 100 grados durante un mínimo de 24 horas para asegurar que no existe nada de humedad. Una vez seca la muestra, se pesa obteniendo el peso seco (Fig. 9a), a continuación, se vierte toda la muestra en la tamizadora (fig.9b) y se mantiene durante 5 minutos vibrando. Una vez vibrado se pesa cada tamiz para obtener el peso retenido y el acumulado. Con estas tablas obtendremos el tamaño máximo del árido, que es aquel tamiz que retiene menos de un 10% de la muestra, y el módulo granulométrico se obtiene mediante la suma de los porcentajes acumulados situados entre el 63 y 0.125 milímetros.

El árido natural calizo se comparara con los dos métodos basados en las curvas teóricas más utilizadas, como son la curva de Bolomey y la curva de Fuller, mediante las siguientes formulas.

$$\text{Bolomey} = a + (100 - a) x \sqrt{\frac{d}{D}}$$

$$\text{Fuller} = 100 x \sqrt{\frac{d}{D}}$$



Figura 9. Procedimiento ensayo tamizado: a) Material seco; b) Tamizadora.

4.1.2 Resultados

A continuación se expresarán los resultados de los cuatro materiales utilizados en el estudio y obtenidos mediante el ensayo de tamizado en cada una de las tres granulometrías (gruesa, media y fina).

Natural granulometría gruesa 10/20*				
Tamiz	retenido	% retenido	% retenido acumulado	% que pasa
125,00	0	0%	0%	100%
63,00	0	0%	0%	100%
31,50	0	0%	0%	100%
16,00	1202,59	93%	93%	7%
8,00	90,05	7%	100%	0%
4,00	0	0%	100%	0%
2,00	0	0%	100%	0%
1,00	0	0%	100%	0%
0,50	0,01	0%	100%	0%
0,25	0,01	0%	100%	0%
0,125	0,05	0%	100%	0%
0,063	0,66	0%	100%	0%
Fondo	0,19	0%	100%	0%
Total	1293,56	100%		
Tamaño máximo árido			D=	31,50
Módulo granulométrico			m=	7,92

Tabla 13. Tomado de estudios anteriores*

Natural granulometría media 4/11*				
Tamiz	Retenido	% retenido	% retenido acumulado	% que pasa
125,00	0	0%	0%	100%
63,00	0	0%	0%	100%
31,50	0	0%	0%	100%
16,00	0	0%	0%	100%
8,00	1230,95	91%	91%	9%
4,00	113,09	8%	99%	1%
2,00	7,45	1%	100%	0%
1,00	1,15	0%	100%	0%
0,50	0,28	0%	100%	0%
0,25	0,38	0%	100%	0%
0,125	1,2	0%	100%	0%
0,063	1,03	0%	100%	0%
Fondo	0,32	0%	100%	0%
Total	1355,85	100%		
Tamaño máximo árido			D=	16,00
Módulo granulométrico			m=	6,89

Tabla 14. Tomado de estudios anteriores*

Natural granulometría fina 0/4*				
Tamiz	retenido	% retenido	% retenido acumulado	% que pasa
125,00	0	0%	0%	100%
63,00	0	0%	0%	100%
31,50	0	0%	0%	100%
16,00	0	0%	0%	100%
8,00	0	0%	0%	100%
4,00	533,17	28%	28%	72%
2,00	277,88	15%	43%	57%
1,00	282,93	15%	58%	42%
0,50	202,09	11%	69%	31%
0,25	174,62	9%	78%	22%
0,125	186,85	10%	88%	12%
0,063	103,78	6%	93%	7%
Fondo	122,54	7%	100%	0%
Total	1883,86	100%		
Tamaño máximo árido			D=	8,00
Módulo granulométrico			m=	3,64

Tabla 15. Tomado de estudios anteriores*

Baldosas granulometría media 4/8				
Tamiz	retenido	% retenido	% retenido acumulado	% que pasa
125,00	0	0%	0%	100%
63,00	0	0%	0%	100%
31,50	0	0%	0%	100%
16,00	0	0%	0%	100%
8,00	713,68	35%	35%	65%
4,00	1057,37	52%	87%	13%
2,00	102,31	5%	92%	8%
1,00	27,31	1%	94%	6%
0,50	19,26	1%	95%	5%
0,25	16,79	1%	95%	5%
0,125	19,78	1%	96%	4%
0,063	32,55	2%	98%	2%
Fondo	40,16	2%	100%	0%
Total	2029,21	100%		
Tamaño máximo árido			D=	16,00
Módulo granulométrico			m=	5,95

Tabla 16. Granulometría BAL

Baldosas granulometría fina 0/4				
Tamiz	retenido	% retenido	% retenido acumulado	% que pasa
125,00	0	0%	0%	100%
63,00	0	0%	0%	100%
31,50	0	0%	0%	100%
16,00	0	0%	0%	100%
8,00	0	0%	0%	100%
4,00	0	0%	0%	100%
2,00	236,61	42%	42%	58%
1,00	143,59	26%	68%	32%
0,50	81,2	15%	82%	18%
0,25	40,08	7%	90%	10%
0,125	20,4	4%	93%	7%
0,063	16,8	3%	96%	4%
Fondo	20,76	4%	100%	0%
Total	559,44	100%		
Tamaño máximo árido			D=	4,00
Módulo granulométrico			m=	3,76

Tabla 17. Granulometría BAL

Ladrillo granulometría media 4/8				
Tamiz	retenido	% retenido	% retenido acumulado	% que pasa
125,00	0	0%	0%	100%
63,00	0	0%	0%	100%
31,50	0	0%	0%	100%
16,00	0	0%	0%	100%
8,00	451,58	23%	23%	77%
4,00	1456,38	74%	97%	3%
2,00	52,46	3%	100%	0%
1,00	2,95	0%	100%	0%
0,50	1,75	0%	100%	0%
0,25	1,01	0%	100%	0%
0,125	0,83	0%	100%	0%
0,063	1,7	0%	100%	0%
Fondo	0,56	0%	100%	0%
Total	1969,22	100%		
Tamaño máximo árido			D=	16,00
Módulo granulométrico			m=	6,19

Tabla 18. Granulometría LH

Ladrillo granulometría fina 0/4				
Tamiz	retenido	% retenido	% retenido acumulado	% que pasa
125,00	0	0%	0%	100%
63,00	0	0%	0%	100%
31,50	0	0%	0%	100%
16,00	0	0%	0%	100%
8,00	0	0%	0%	100%
4,00	0	0%	0%	100%
2,00	268,58	48%	48%	52%
1,00	167,43	30%	78%	22%
0,50	63,31	11%	89%	11%
0,25	24,35	4%	93%	7%
0,125	13,42	2%	96%	4%
0,063	17,59	3%	99%	1%
Fondo	6,2	1%	100%	0%
Total	560,88	100%		
Tamaño máximo árido			D=	4,00
Módulo granulométrico			m=	4,04

Tabla 19. Granulometría LH

Sanitario granulometría media 4/8				
Tamiz	retenido	% retenido	% retenido acumulado	% que pasa
125,00	0	0%	0%	100%
63,00	0	0%	0%	100%
31,50	0	0%	0%	100%
16,00	0	0%	0%	100%
8,00	955,94	44%	44%	56%
4,00	1100,61	51%	95%	5%
2,00	112,91	5%	100%	0%
1,00	2,64	0%	100%	0%
0,50	0,64	0%	100%	0%
0,25	0,45	0%	100%	0%
0,125	0,38	0%	100%	0%
0,063	0,34	0%	100%	0%
Fondo	0,42	0%	100%	0%
Total	2174,33	100%		
Tamaño máximo árido			D=	16,00
Módulo granulométrico			m=	6,38

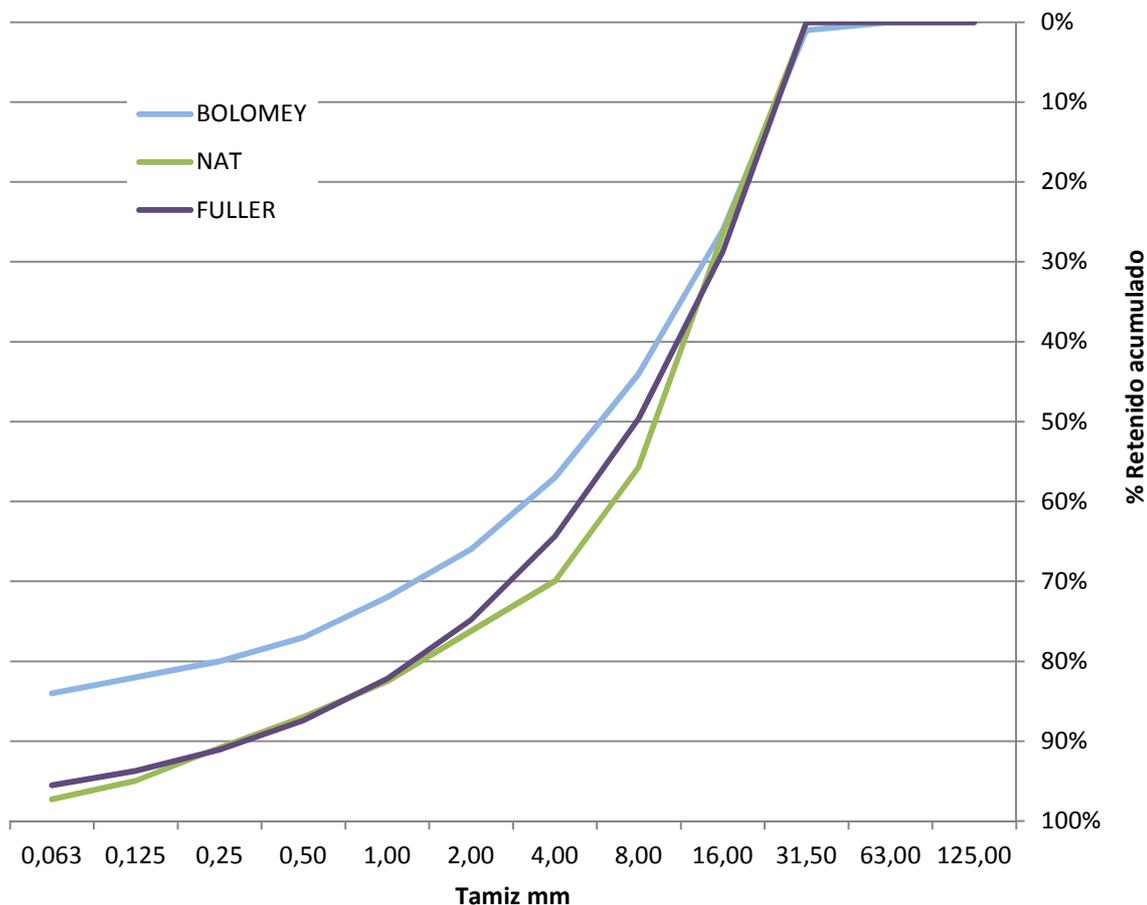
Tabla 20. Granulometría SAN

Sanitario granulometría fina 0/4				
Tamiz	retenido	% retenido	% retenido acumulado	% que pasa
125,00	0	0%	0%	100%
63,00	0	0%	0%	100%
31,50	0	0%	0%	100%
16,00	0	0%	0%	100%
8,00	0	0%	0%	100%
4,00	0	0%	0%	100%
2,00	233,05	39%	39%	61%
1,00	198,43	33%	72%	28%
0,50	81,77	14%	86%	14%
0,25	35,11	6%	92%	8%
0,125	21,3	4%	95%	5%
0,063	15,21	3%	98%	2%
Fondo	13,66	2%	100%	0%
Total	598,53	100%		
Tamaño máximo árido			D=	4,00
Módulo granulométrico			m=	3,84

Tabla 21. Granulometría SAN

4.1.3 Comparativa de resultados

En la siguiente gráfica se compara el árido natural calizo con la curva de Bolomey y la de Fuller; se suman los resultados del árido natural calizo en las granulometrías gruesa, media y fina y se comparan con las curvas teóricas.



Gráfica 5. Granulometría natural, Bolomey y Fuller

4.1.4 Conclusiones

Por una parte se observa que la granulometría de los tres residuos utilizados son muy similares entre ellos.

Por otra parte el árido natural se ha comparado con las curvas teóricas más utilizadas como las de Bolomey y Fuller, el árido natural calizo presenta una curva granulométrica muy parecida a la de Fuller, salvo por un pequeño salto en el tamiz de 8 y 4 mm, pero después se iguala en el resto de la curva, la curva de Bolomey permanece con unos valores más bajos comparados a las curvas de Fuller y del árido natural calizo.

4.2 Coeficiente de absorción

4.2.1 Procedimiento

El ensayo se realizó según la norma UNE-EN 1097-6:2014.

En el siguiente ensayo, los procedimientos en la granulometría media o fina son diferentes.

La granulometría media debe estar completamente seca, se debe introducir en una estufa a 100 grados durante un mínimo de 24 horas para asegurar que no existe nada de humedad. Una vez seca la muestra se pesa obteniendo el peso seco (Fig. 10a), a continuación en un vaso de precipitado se verterá la muestra y se le añade agua hasta que quede totalmente sumergida, se mantendrá así durante 24 horas para que el agua penetre bien en la muestra (Fig. 10b). Finalmente, con un papel se secura solamente el excedente de agua superficial y se pesa de nuevo la muestra, obteniendo el peso saturado de ésta, con estos datos y la siguiente formula se obtendrá el coeficiente de absorción de la muestra.

En cuanto a la granulometría fina, la muestra debe estar completamente seca, se debe introducir en una estufa a 100 grados durante un mínimo de 24 horas para asegurar que no existe nada de humedad. Una vez seca la muestra se pesa obteniendo el peso seco (Fig. 10a), se separa una muestra de aproximadamente 300 gramos, se satura la muestra con agua y se vierte en el cono (Fig. 10c), con un pisón se da 25 golpes y se retira el cono, se da por correcto el ensayo cuando al retirar el cono mantiene la altura inicial y los bordes superiores se desmoronan levemente, se pesa la muestra y se obtiene el peso saturado, con estos datos y la siguiente formula se obtendrá el coeficiente de absorción de la muestra.

$$\text{Coeficiente de absorción} = \frac{P_{\text{sat}} - P_{\text{s}}}{P_{\text{s}}} \times 100$$

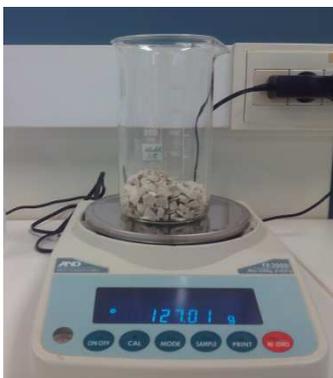


Fig. 10a



Fig. 10b



Fig. 10c

Figura 10. Procedimiento ensayo coeficiente de absorción: a) Material seco; b) Material sumergido en agua 24 horas; c) Ensayo cono, para granulometría fina.

4.2.2 Resultados

4.2.2.1 Natural (NAT)

Árido natural granulometría gruesa 10/20

Peso seco: 201.61 g.

Peso saturado: 204.07 g.

$$\text{Coeficiente de absorción} = \frac{204.07 - 201.61}{201.61} \times 100 = 1.22\%$$

Árido natural granulometría media 4/11

Peso seco: 154.2 g.

Peso saturado: 154.58 g.

$$\text{Coeficiente de absorción} = \frac{154.58 - 154.2}{154.2} \times 100 = 0.25\%$$

Árido natural granulometría fina 0/4

Peso seco: 426.68 g.

Peso saturado: 428.5 g.

$$\text{Coeficiente de absorción} = \frac{428.5 - 426.68}{426.68} \times 100 = 0.43\%$$

4.2.2.2 Baldosas (BAL)

Baldosas granulometría media 4/8

Peso seco: 129.32 g.

Peso saturado: 140.87 g.

$$\text{Coeficiente de absorción} = \frac{140.87 - 129.32}{129.32} \times 100 = 8.93\%$$

Baldosas granulometría fina 0/4

Peso seco: 305.07 g.

Peso saturado: 324.25 g.

$$\text{Coeficiente de absorción} = \frac{324.25 - 305.07}{305.07} \times 100 = 6.28\%$$

4.2.2.3 Ladrillo (LH)

Ladrillo granulometría media 4/8

Peso seco: 129.75 g.

Peso saturado: 153.51 g.

$$\text{Coeficiente de absorción} = \frac{153.51 - 129.75}{129.75} \times 100 = 18.31\%$$

Ladrillo granulometría fina 0/4

Peso seco: 306.96 g.

Peso saturado: 355.34 g.

$$\text{Coeficiente de absorción} = \frac{355.34 - 306.96}{306.96} \times 100 = 15.76\%$$

4.2.2.4 Sanitario (SAN)

Sanitario granulometría media 4/8

Peso seco: 124.74 g.

Peso saturado: 127.02 g.

$$\text{Coeficiente de absorción} = \frac{127.02 - 124.74}{124.74} \times 100 = 1.83\%$$

Sanitario granulometría fina 0/4

Peso seco: 302.07 g.

Peso saturado: 304.17 g.

$$\text{Coeficiente de absorción} = \frac{304.17 - 302.07}{302.07} \times 100 = 0.69\%$$

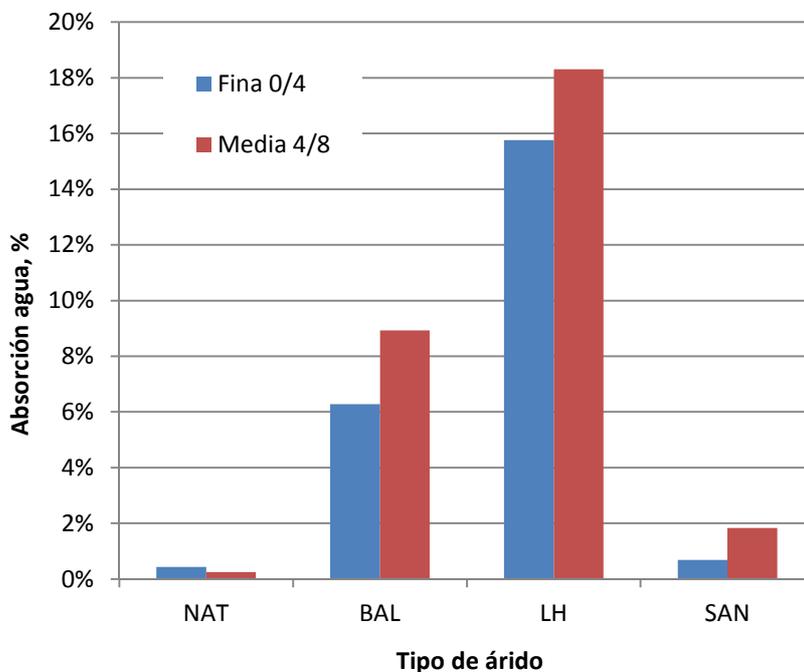
4.2.3 Comparativa de resultados

En la siguiente tabla se recopilan los datos obtenidos de los cálculos realizados en el apartado anterior (coeficiente de absorción).

Coeficiente Absorción	
NAT 10/20	1.22%
NAT 4/11	0.25%
NAT 0/4	0.43%
BAL 4/8	8.93%
BAL 0/4	6.28%
LH 4/8	18.31%
LH 0/4	15.76%
SAN 4/8	1.83%
SAN 0/4	0.69%

Tabla 22. Coeficiente de absorción

En la siguiente gráfica se representan los datos obtenidos del coeficiente de absorción de cada material utilizado, diferenciados según su granulometría fina y media.



Gráfica 6. Coeficiente de absorción

4.2.4 Conclusiones

Se observa que existe una gran diferencia de absorción de agua entre el árido natural y los residuos añadidos. Mientras que el sanitario tiene un coeficiente de absorción ligeramente superior que el árido natural, las baldosas y el ladrillo absorben mucho más agua. Siendo el ladrillo el que mayor coeficiente de absorción tiene (superior a un 18%), debido a la porosidad de éste. Se puede considerar un leve error en el árido fino, ya que el ensayo es totalmente objetivo por parte de quien lo realiza. Debido a la gran diferencia los resultados obtenidos y la importancia del agua en la realización del hormigón, se utilizarán estos resultados para la posterior planificación del estudio y obtener así, una rectificación de la relación agua/cemento efectiva.

4.3 Densidad aparente

4.3.1 Procedimiento

El ensayo se realizó según la norma UNE EN 1097-3:1999.

En primer lugar, la muestra debe estar completamente seca, se debe introducir en una estufa a 100 grados durante un mínimo de 24 horas para asegurar que no existe nada de humedad. Una vez seca, la muestra se pesa para obtener el peso seco (Fig. 11a), se introduce la muestra en un recipiente de dimensiones conocidas (Fig. 11b), en nuestro caso 1000 mm.

Con estos datos y la siguiente formula se obtiene la densidad aparente.

$$\text{Densidad aparente} = \frac{\text{Peso seco}}{\text{Volumen aparente}}$$



Fig. 11a



Fig. 11b

Figura 11. Procedimiento ensayo densidad aparente: a) Material seco; b) Recipiente con dimensiones conocidas.

4.3.2 Resultados

4.3.2.1 Baldosas (BAL)

Baldosas granulometría media 4/8

Peso seco: 1264.69 g.

Volumen recipiente 1000 ml.

$$\text{Densidad aparente} = \frac{1264.69 \text{ g}}{1000 \text{ ml}} = 1.265 \text{ g/cm}^3$$

Baldosas granulometría fina 0/4

Peso seco: 1421.83 g.

Volumen recipiente 1000 ml.

$$\text{Densidad aparente} = \frac{1421.83 \text{ g}}{1000 \text{ ml}} = 1.422 \text{ g/cm}^3$$

4.3.2.2 Ladrillo (LH)

Ladrillo granulometría media 4/8

Peso seco: 966.15 g.

Volumen recipiente 1000 ml.

$$\text{Densidad aparente} = \frac{966.15 \text{ g}}{1000 \text{ ml}} = 0.966 \text{ g/cm}^3$$

Ladrillo granulometría fina 0/4

Peso seco: 1057.95 g.

Volumen recipiente 1000 ml.

$$\text{Densidad aparente} = \frac{1057.95 \text{ g}}{1000 \text{ ml}} = 1.058 \text{ g/cm}^3$$

4.3.2.3 Sanitario (SAN)

Sanitario granulometría media 4/8

Peso seco: 1245.72 g.

Volumen recipiente 1000 ml.

$$\text{Densidad aparente} = \frac{1245.72 \text{ g}}{1000 \text{ ml}} = 1.246 \text{ g/cm}^3$$

Sanitario granulometría fina 0/4

Peso seco: 1236.5 g.

Volumen recipiente 1000 ml.

$$\text{Densidad aparente} = \frac{1236.5 \text{ g}}{1000 \text{ ml}} = 1.236 \text{ g/cm}^3$$

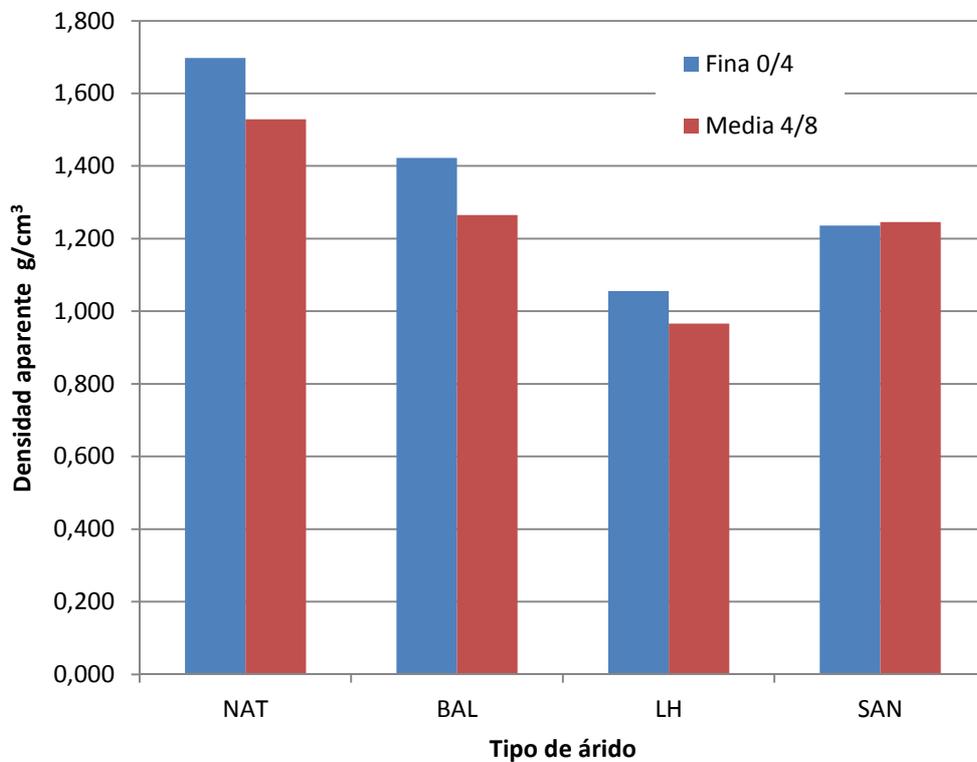
4.3.3 Comparativa de resultados

En la siguiente tabla se recopilan los datos obtenidos de los cálculos realizados en el apartado anterior (Densidad aparente).

Densidad Aparente	
NAT 4/11*	1.529 g/cm ³
NAT 0/4*	1.698 g/cm ³
BAL 4/8	1.265 g/cm ³
BAL 0/4	1.422 g/cm ³
LH 4/8	0.966 g/cm ³
LH 0/4	1.056 g/cm ³
SAN 4/8	1.246g/cm ³
SAN 0/4	1.236 g/cm ³

Tabla 23. Densidad aparente. Tomado de estudios anteriores*

En la siguiente gráfica se representan los datos obtenidos de densidad aparente de cada material utilizado, diferenciados según su granulometría fina y media.



Gráfica 7. Densidad aparente

4.3.4 Conclusiones

Se observa que el menos denso es el ladrillo, con una densidad alrededor de 1g/cm^3 y el más denso es el residuo de baldosas con una media de 1.3 g/ cm^3 . El ladrillo tiene una densidad menor, pero se encuentra dentro de la media, por lo que no existirán grandes diferencias entre los tres residuos utilizados para realizar los ensayos. Todos los residuos tienen una densidad levemente menor que la del árido calizo natural.

4.4 Densidad de las partículas

4.4.1 Procedimiento

El ensayo se realizó según la norma UNE EN 1097-7:2009.

En primer lugar, la muestra debe estar completamente seca, se debe introducir en una estufa a 100 grados durante un mínimo de 24 horas para asegurar que no existe nada de humedad. Una vez seca la muestra se pesa obteniendo el peso seco (Fig. 12a). Se llena un picnómetro con agua hasta la marca establecida y se pesa (Fig. 12b), para finalizar se introduce la muestra en el picnómetro con agua hasta la marca establecida y se pesa de nuevo (Fig. 12c). Con estos datos y la siguiente formula se obtiene la densidad de las partículas.

$$\text{Densidad partículas} = \frac{P_s}{P_s - (\text{Pic. con agua y muestra} - \text{Pic. con agua})} \times \text{Densidad agua}$$



Fig. a



Fig. b



Fig. c

Figura 12. Procedimiento ensayo densidad de las partículas: a) Material seco; b) Picnómetro con muestra; c) Picnómetro con agua.

4.4.2 Resultados

4.4.2.1 Baldosas (BAL)

Baldosas granulometría media 4/8

Densidad del agua: 1g/cm³

Peso seco: 110.4 g.

Peso picnómetro con agua: 1203.7 g.

Peso picnómetro con agua y muestra: 1265.73 g.

$$D_p = \frac{110.4}{110.4 - (1265.73 - 1203.7)} \times 1 = 2.2824 \text{ g/cm}^3$$

Baldosas granulometría fina 0/4

Densidad del agua: 1g/cm³

Peso seco: 122.49 g.

Peso picnómetro con agua: 1203.7 g.

Peso picnómetro con agua y muestra: 1276.45 g.

$$D_p = \frac{122.49}{122.49 - (1276.45 - 1203.7)} \times 1 = 2.4626 \text{ g/cm}^3$$

4.4.2.2 Ladrillo (LH)

Ladrillo granulometría media 4/8

Densidad del agua: 1g/cm³

Peso seco: 117.39 g.

Peso picnómetro con agua: 1203.7 g.

Peso picnómetro con agua y muestra: 1271.15 g.

$$D_p = \frac{117.39}{117.39 - (1271.15 - 1203.7)} \times 1 = 2.3506 \text{ g/cm}^3$$

Ladrillo granulometría fina 0/4

Densidad del agua: 1g/cm³

Peso seco: 108.48 g.

Peso picnómetro con agua: 1203.7 g.

Peso picnómetro con agua y muestra: 1268.39 g.

$$D_p = \frac{108.48}{108.48 - (1268.39 - 1203.7)} \times 1 = 2.4773 \text{ g/cm}^3$$

4.4.2.3 Sanitario (SAN)

Sanitario granulometría media 4/8

Densidad del agua: 1g/cm³

Peso seco: 117.58 g.

Peso picnómetro con agua: 1203.7 g.

Peso picnómetro con agua y muestra: 1269.79 g.

$$D_p = \frac{117.58}{117.58 - (1269.79 - 1203.7)} \times 1 = 2.2835 \text{ g/cm}^3$$

Sanitario granulometría fina 0/4

Densidad del agua: 1g/cm³

Peso seco: 103.82 g.

Peso picnómetro con agua: 1203.7 g.

Peso picnómetro con agua y muestra: 1264.52 g.

$$D_p = \frac{103.82}{103.82 - (1264.52 - 1203.7)} \times 1 = 2.4144 \text{ g/cm}^3$$

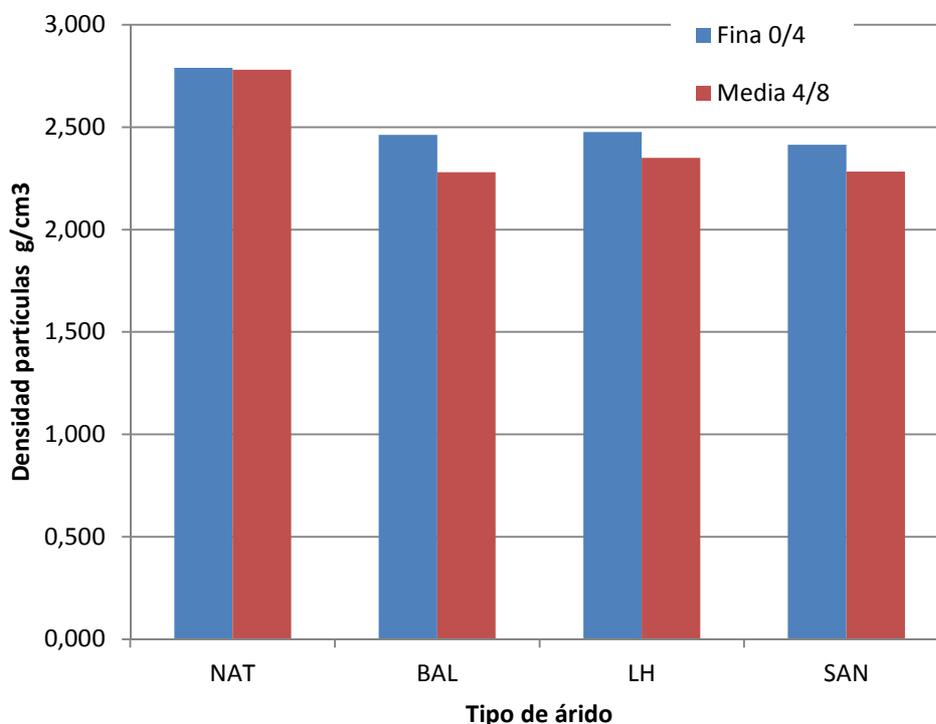
4.4.3 Comparativa de resultados

En la siguiente tabla se recopilan los datos obtenidos de los cálculos realizados en el apartado anterior (Densidad de las partículas).

Densidad de las partículas	
NAT 4/11*	2.780 g/cm ³
NAT 0/4*	2.790 g/cm ³
BAL 4/8	2.280 g/cm ³
BAL 0/4	2.463 g/cm ³
LH 4/8	2.350 g/cm ³
LH 0/4	2.477 g/cm ³
SAN 4/8	2.283 g/cm ³
SAN 0/4	2.414 g/cm ³

Tabla 24. Densidad de las partículas. Tomado de estudios anteriores*

En la siguiente gráfica se representan los datos obtenidos de densidad de las partículas de cada material utilizado, diferenciados según su granulometría fina y media.



Gráfica 8. Densidad de las partículas

4.4.4 Conclusiones

En el apartado anterior sobre la densidad aparente, el residuo de ladrillo era inferior que los otros dos residuos, pero se observa que la densidad de las partículas de los materiales es muy similar en todos ellos, a excepción del árido natural calizo, que es superior. Por lo tanto la densidad de las partículas, es un dato que no tendrá importancia en el planeamiento del estudio. En los resultados del ensayo se observan diferencias en el mismo material, pero en las diferentes granulometrías (media y fina), esto se debe a que la muestra no está triturada, por lo que varían los resultados debido a la porosidad interior del material; en la granulometría fina se obtienen unos resultados un poco más altos ya que posee menos poros por menor dimensión de la muestra.

4.5 Equivalente de arena

4.5.1 Procedimiento

El ensayo se realizó según la norma UNE EN 933-8:2012.

En primer lugar la muestra debe estar completamente seca, se debe introducir en una estufa a 100 grados durante un mínimo de 24 horas para asegurar que no existe nada de humedad (Fig.13a). Se pasa por un tamiz de 5 mm y se utilizan 120 gramos de muestra que ha pasado por el tamiz (Fig. 13b). Se llena una probeta con 100 ml de disolución lavadora (Fig. 13c), se vierte la muestra, se mueve para evitar burbujas en la muestra y se deja reposar 10 minutos (Fig. 13d). Se coloca la probeta en un agitador mecánico durante 30 segundos y 90 ciclos (Fig. 13e). Finalmente se rellena con disolución lavadora hasta llegar a los 380 mm de la probeta y se deja reposar 20 minutos (Fig. 13f). Se realizan dos lecturas (Fig. 13g), una a vista y otra a pisón mediante las siguientes formulas. Los resultados obtenidos se redondearan al entero más próximo.

$$\text{Equivalente arena a vista} = \frac{100 \times H2}{H1}$$

$$\text{Equivalente arena a pisón} = \frac{100 \times H2'}{H1}$$



Fig. a



Fig. b



Fig. c

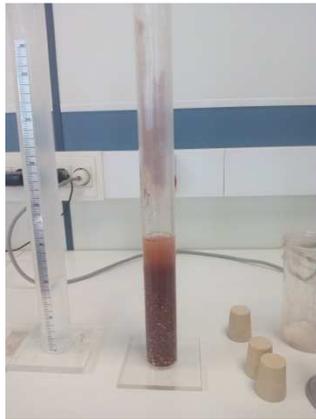


Fig. d



Fig. e



Fig. f

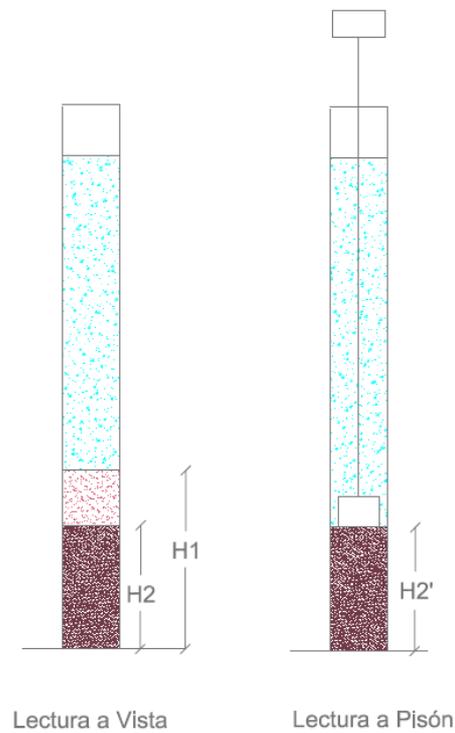


Fig. g

Fig. 13. Procedimiento ensayo equivalente arena: a) Material seco; b) 120 g de muestra, tamiz 5mm; c) 100 ml de disolución lavadora; d) Muestra con disolución lavadora; e) Agitador mecánico; f) Muestra en reposo; g) Lectura de muestras.

4.5.2 Resultados

4.5.2.1 Natural (NAT)

H1: 9.9 cm

H2: 9.2 cm

H2': 8.8 cm

$$\text{Vista} = \frac{100 \times 9.2}{9.9} = 93$$

$$\text{Pisón} = \frac{100 \times 8.8}{9.9} = 89$$

4.5.2.2 Baldosas (BAL)

H1: 12.1 cm

H2: 11.1 cm

H2': 10.6 cm

$$\text{Vista} = \frac{100 \times 11.1}{12.1} = 95$$

$$\text{Pisón} = \frac{100 \times 10.6}{12.1} = 88$$

4.5.2.3 Ladrillo (LH)

H1: 14.2 cm

H2: 13 cm

H2': 12.8 cm

$$\text{Vista} = \frac{100 \times 13}{14.2} = 92$$

$$\text{Pisón} = \frac{100 \times 12.8}{14.2} = 90$$

4.5.2.4 Sanitario (SAN)

H1: 13.2 cm

H2: 13 cm

H2': 13 cm

$$\text{Vista} = \frac{100 \times 13}{13.2} = 98$$

$$\text{Pisón} = \frac{100 \times 13}{13.2} = 98$$

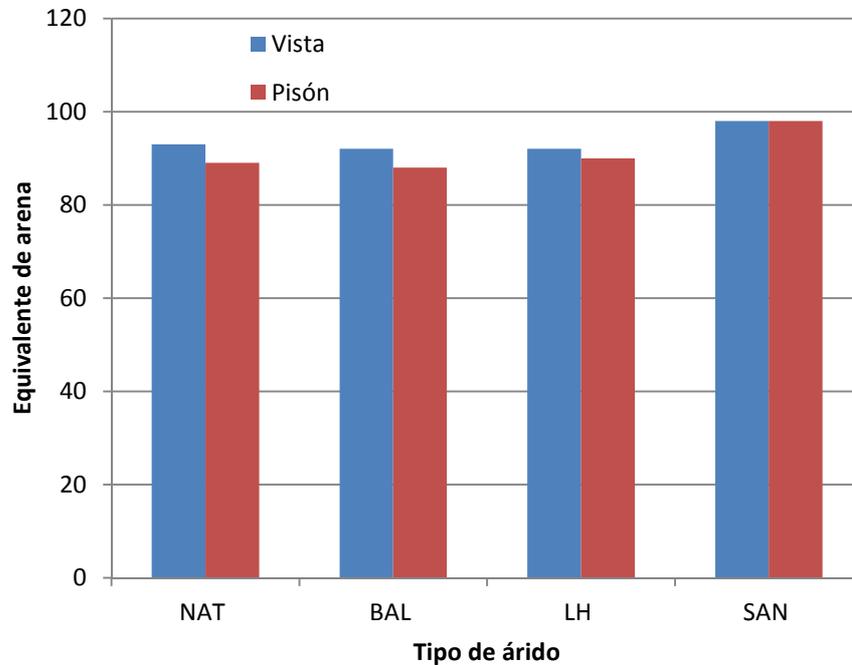
4.5.3 Comparativa de resultados

En la siguiente tabla se recopilan los datos obtenidos de los cálculos realizados en el apartado anterior (Equivalente de arena).

Equivalente arena		
	Vista	Pisón
NAT 0/5	93	89
BAL 0/5	92	88
LH 0/5	92	90
SAN 0/5	98	98

Tabla 25. Equivalente de arena

En la siguiente gráfica se representan los datos obtenidos del equivalente de arena de cada material utilizado, diferenciados según su lectura a vista y pisón.



Gráfica 9. Equivalente de arena

4.5.4 Conclusiones

EQUIVALENTE ARENA A VISTA		
Arena con muchos finos	Arena limpia	Arena muy limpia
EAV < 75	EAV 75-80	EAV > 80

Tabla 26. Equivalente de arena lectura a vista

Los resultados obtenidos en los tres residuos determinan que el equivalente de arena es mínimo, por lo que las muestras se considerarán muy limpias, obteniendo los residuos de ladrillo y baldosas resultados muy parecidos al árido natural calizo, el residuo de cerámica sanitaria es el que ha obtenido los resultados más altos (más limpio).

4.6 Fragmentación

4.6.1 Procedimiento

El ensayo se realizó mediante la adaptación de dos normas, la norma UNE EN 1097-1:2011 para el árido medio y la norma UNE-83 115/89 para el árido fino.

El procedimiento de ensayo varía entre el árido medio y fino. En el árido medio, la muestra debe estar completamente seca, se debe introducir en una estufa a 100 grados durante un mínimo de 24 horas para asegurar que no existe nada de humedad (Fig.14a). Se pasa por un tamiz de entre 14 y 10 mm (Como no se disponían de estos tamices, se han utilizado tamices de 16 y 8 mm), se utilizan 1000 gramos de muestra que ha pasado por el tamiz. En un tambor (Fig. 14b) se vierte la muestra seca con 2.5 litros de agua y 5 kilos de bolas de acero, se tapa el tambor y se programa la máquina a 12000 vueltas a 100 rpm (Fig. 14d). Una vez finalizado el proceso, se lava y tamiza el árido entre 8 y 2 mm, se introduce en una estufa a 100 grados durante un mínimo de 24 horas para asegurar que no existe nada de humedad y se pesa la muestra obtenida, el resultado se obtiene dividiendo la masa final por la inicial, y es expresada en porcentaje.

En el árido fino, la muestra debe estar completamente seca, se debe introducir en una estufa a 100 grados durante un mínimo de 24 horas para asegurar que no existe nada de humedad (Fig. 14a). Se pasa por un tamiz de entre 2 y 0.125 mm, se utilizan 500 gramos de muestra que ha pasado por el tamiz. En un tambor (Fig. 14b), se vierte la muestra seca con 2'5 litros de agua y 2'5 kilos de bolas de acero (Fig. 14c), se tapa el tambor y se programa la máquina a 15000 vueltas a 100 rpm (Fig. 14d). Una vez finalizado el proceso, se lava y tamiza el árido entre 2 y 0.063 mm, se introduce en una estufa a 100 grados durante un mínimo de 24 horas para asegurar que no existe nada de humedad y se pesa la muestra obtenida (Fig. 14e), el resultado se obtiene dividiendo la masa final por la inicial y es expresada en porcentaje.



Fig. a



Fig. b



Fig. c



Fig. d



Fig. e

Fig. 14. Procedimiento ensayo fragmentación: a) Material seco; b) Tambor donde se vierte agua, muestra y bolas de acero; c) Bolas de acero; d) Maquina friabilidad; e) Muestra final del ensayo.

4.6.2 Resultados

En la siguiente tabla se recopilan los datos obtenidos del ensayo de friabilidad en la granulometría media, el resultado es el porcentaje final que queda de la muestra.

Árido medio			
Muestra	Muestra inicial	Muestra final	Resultado
NAT	1000 g	799.6 g	80%
BAL	1000 g	844.8 g	84.5%
LH	1000 g	578.3 g	57.8%
SAN	1000 g	927 g	92.7%

Tabla 27. Ensayo friabilidad árido granulometría media

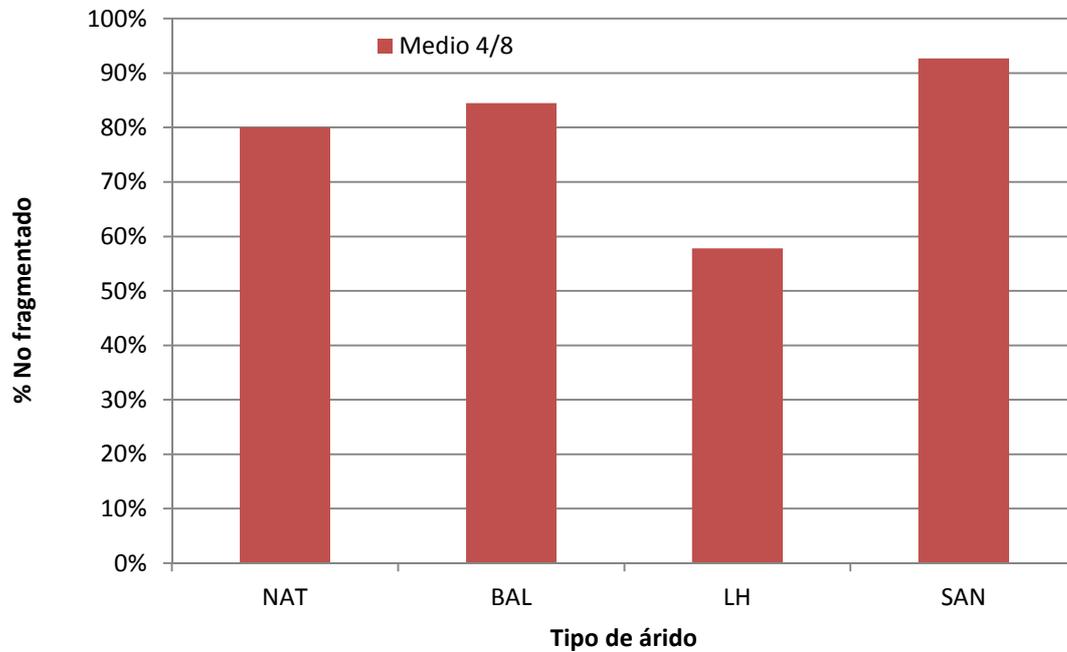
En la siguiente tabla se recopilan los datos obtenidos del ensayo de friabilidad en la granulometría fina, el resultado es el porcentaje final que queda de la muestra.

Árido fino			
Muestra	Muestra inicial	Muestra final	Resultado
NAT	500 g	10.3 g	2.1%
BAL	500 g	16.3 g	3.3%
LH	500 g	2.7 g	0.5%
SAN	500 g	25.2 g	5%

Tabla 28. Ensayo friabilidad árido granulometría fina

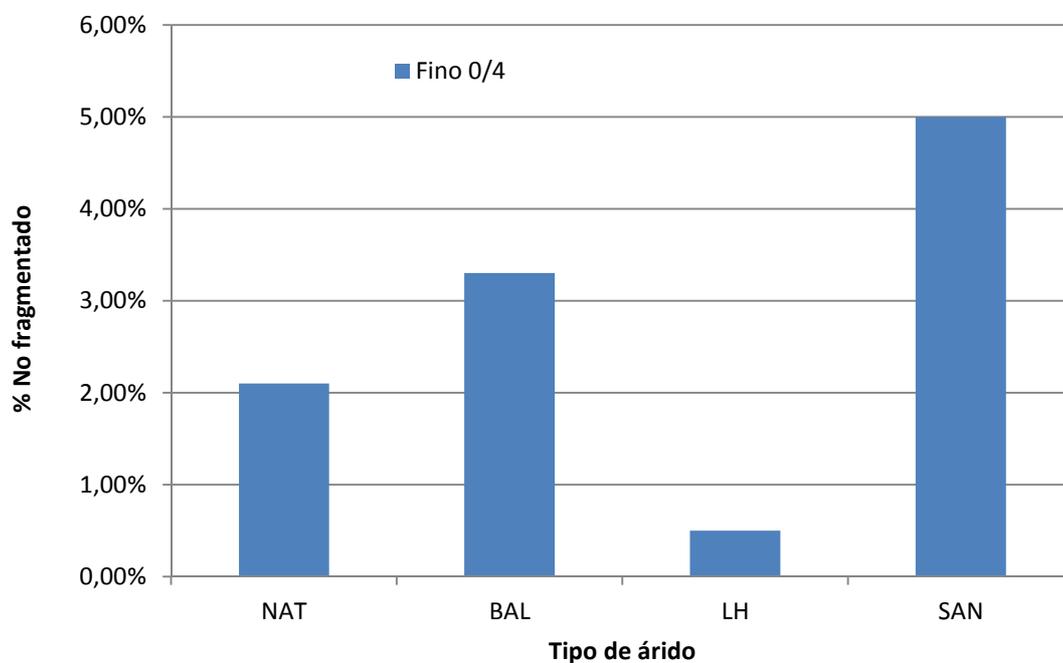
4.6.3 Comparativa de resultados

En la siguiente gráfica se representan los datos obtenidos en la tabla del apartado anterior (Tabla 27) granulometría media, se representa el porcentaje no fragmentado después del ensayo.



Grafica 10. Ensayo friabilidad árido granulometría media

En la siguiente gráfica se representan los datos obtenidos en la tabla del apartado anterior (Tabla 28) granulometría fina, se representa el porcentaje no fragmentado después del ensayo.



Gráfica 11. Ensayo friabilidad árido granulometría fina

4.6.4 Conclusiones

Se observa que el sanitario da el valor más alto (más compacto), esto se produce porque al fabricar piezas sanitarias se trabaja la materia prima a temperaturas más altas que la baldosa, siendo ambos más compactos que el árido natural calizo. El ladrillo registra el menor valor debido a su porosidad y menor compacidad, muy por debajo de los otros resultados.

Destaca la gran diferencia entre la granulometría media y fina, en la granulometría fina la pérdida del material es mucho mayor, al ser las partículas más pequeñas y más frágiles.

4.7 Coeficiente de forma

4.7.1 Procedimiento

El ensayo se realizó según la norma UNE-EN 933-4:2008

En primer lugar, la muestra debe estar completamente seca, se debe introducir en una estufa a 100 grados durante un mínimo de 24 horas para asegurar que no existe nada de humedad (Fig.15a). Se separa la muestra entre tamices de 16 y 4 mm, aproximadamente se realiza el ensayo con 1000 gramos de muestra. A la muestra inicial se le denominara M_0 , la muestra se tamiza entre 16 y 8 mm y se pesa obteniendo $M_{1.2}$, y la muestra entre 4 y 8 mm, se pesa obteniendo $M_{1.1}$. Cada una de las dos muestras se revisan con un pie de rey, todas las partículas que tengan una relación tres veces mayor, entre la longitud y espesor de la partícula serán denominadas no cubicas (Fig.15b), se separaran y pesaran obteniendo en la fracción 8/16 el valor $M_{2.2}$ y en la fracción 4/8 el valor $M_{2.1}$, con estos datos y las siguientes formulas se obtiene el coeficiente de forma. El resultado de redondea al entero más próximo.

M_0 = muestra total

$M_{1.1}$ = Muestra fino 4/8

$M_{1.2}$ = Muestra medio 8/16

$M_{2.1}$ = Muestra no cubicas fino 4/8

$M_{2.2}$ = Muestra no cubicas medio 8/16

V_1 = Porcentaje muestra fino 4/8

$$V1 = \frac{M1.1}{M0} \times 100$$

V_2 = Porcentaje muestra medio 8/16

$$V2 = \frac{M1.2}{M0} \times 100$$

SI_1 = Porcentaje no cubicas fino 4/8

$$SI1 = \frac{M2.1}{M1.1} \times 100$$

SI_2 = Porcentaje no cubicas medio 8/16

$$SI_2 = \frac{M_{2.2}}{M_{1.2}} \times 100$$

SI = Porcentaje coeficiente de forma

$$SI = \frac{V_1 \times SI_1 + V_2 \times SI_2}{100}$$



Fig. a



Fig. b

Figura 15. Procedimiento ensayo coeficiente de forma: a) Material seco; b) Partículas no cúbicas.

4.7.2 Resultados

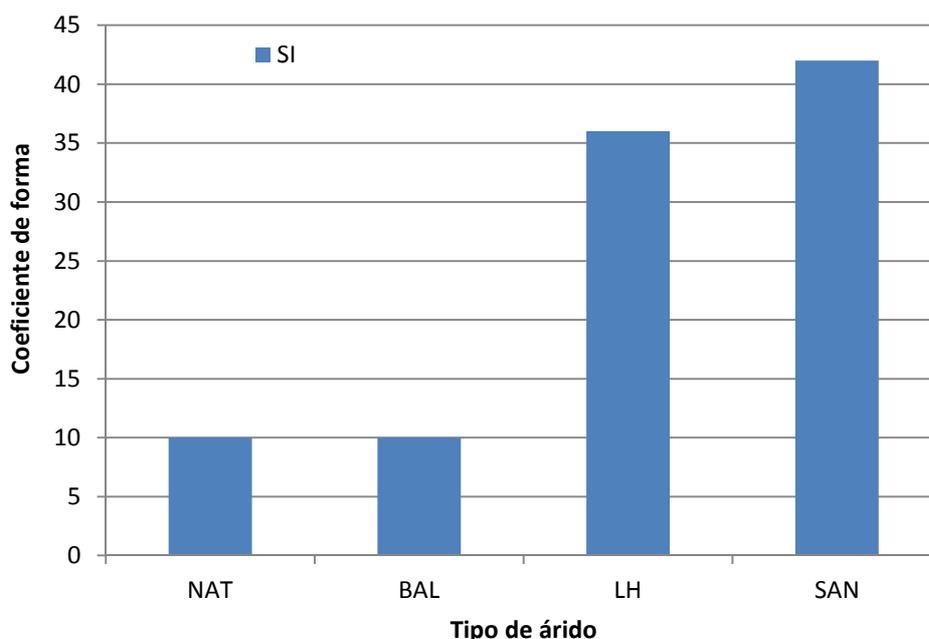
En la siguiente tabla se recopilan los datos obtenidos de los cálculos realizados en el apartado anterior (Coeficiente de forma). Las muestras estas expresadas en gramos, el árido natural calizo ya viene separado en dos fracciones bien diferenciadas desde fábrica, por lo que se ha ensayado para el mayor una granulometría de 10/20 en lugar de 8/16 y para la menor 4/11 en lugar de 4/8.

Coeficiente de forma										
	M ₀	M _{1.1}	M _{2.1}	M _{1.2}	M _{2.2}	V ₁	V ₂	SI ₁	SI ₂	SI
NAT	1086.3	524.7	56.16	561.7	55.65	48.3%	51.7%	10.7%	9.9%	10
BAL	997.6	464.8	46.52	532.8	49.57	46.6%	53.4%	10%	9.3%	10
LH	883	374.5	57.7	508.5	262.2	42.4%	57.6%	15.4%	51.6%	36
SAN	903.4	426.3	226.3	477.1	153.7	47.2%	52.8%	53.1%	32.2%	42

Tabla 29. Coeficiente de forma

4.7.3 Comparativa de resultados

En la siguiente gráfica se representan los datos obtenidos del coeficiente de forma de cada material utilizado, partículas no cubicas.



Gráfica 12. Coeficiente de forma

4.7.4 Conclusiones

El árido natural y el residuo de baldosas muestran un mismo resultado por lo que a la hora de fabricar el hormigón las partículas tendrán el mismo comportamiento. Por el contrario, los otros dos residuos tienen un coeficiente de forma considerablemente más alto y esto puede repercutir en la compactación del hormigón, puesto que al obtener un hormigón menos uniforme pueden producirse coqueas. En el caso del ladrillo, estos resultados se deben a que a que en la fracción de la serie 8/16 mm, al ser el grosor de 3 mm, más de la mitad de las partículas eran no cúbicas, y en la fracción de la serie 4/8 mm, no ha repercutido tanto el espesor del ladrillo, al ser las partículas de menores dimensiones. Puesto que el residuo sanitario tiene una estructura más lajosa ambos resultados son más altos, siendo la fracción de la serie 4/8 más alta por esta estructura del material.

4.8 Conclusiones

Una vez obtenido todos los resultados de los ensayos físicos, se determina que en el tamizado, los residuos tienen un pequeño porcentaje más de árido fino, aunque más limpio en comparación con el árido natural. Por lo que respecta a las densidades aparentes y de partículas, los residuos ofrecen una menor densidad pero no muy diferente al árido natural calizo. En el ensayo de fragmentación, el ladrillo debido a que es menos compacto y más poroso da unos resultados muy inferiores a los otros residuos y al árido natural calizo. Sin embargo, los residuos sanitarios y del ladrillo hueco presentan un coeficiente de forma muy elevado (forma más irregular), debido a que el ladrillo tiene un espesor de 3 mm y el sanitario tiene una estructura lajosa. No obstante, la propiedad que más va a repercutir en la realización del hormigón es el coeficiente de absorción de agua, el sanitario está más o menos a la altura de absorción del árido natural calizo, las baldosas y sobretudo el ladrillo al ser poroso muy superiores, por lo que se tendrá que tener muy en cuenta el agua efectiva a la hora de realizar el hormigón.

“El éxito es solamente el subproducto del trabajo bien hecho, simple y honesto.” (Mies Van der Rohe)

5. ENSAYOS PRELIMINARES DEL HORMIGÓN

5.1 Introducción

Una vez realizada la caracterización física de los áridos utilizados, habiéndolos comparados con el natural, y determinado el hormigón a desarrollar, se procede a realizar los ensayos preliminares.

El objetivo del presente proyecto es desarrollar un hormigón HA-30/P/20, habitualmente utilizado en construcción, para lo cual se utilizará un cemento Cem II/A-V/42.5R. La dosificación recomendada para desarrollar el hormigón ha sido proporcionada por el fabricante (tabla 30).

A causa de la disparidad de los resultados obtenidos en la caracterización de los áridos, en los ensayos preliminares de las amasadas de hormigón se buscará una relación agua cemento baja, para poder comparar correctamente todos los resultados y así tener un cono de Abrams similar y una trabajabilidad parecida en todas las amasadas. Utilizando además, el mínimo de aditivo posible pero tratando de conseguir una consistencia en el cono de Abrams entre blanda y plástica, sobre 5 cm aproximadamente.

Dosificación Hormigón HA-30/P/20	
Cemento	300 Kg/m ³
Agua	150 Kg/m ³
Árido 0/4	870 Kg/m ³
Árido 4/11	270 Kg/m ³
Árido 10/20	800 Kg/m ³

Tabla 30. Dosificación del fabricante

5.2 Pruebas dosificación

No es redundante destacar que el proceso de diseño de una mezcla no es tan simple como la aplicación de un método racional, cualquiera sea éste. En el desarrollo mismo de cada uno de los métodos hay que considerar la interrelación entre distintos factores que influyen en las propiedades y características de las mezclas.

En todas las pruebas realizadas se obtuvieron dos conos de Abrams y la media de los dos conos es el resultado reflejado en el estudio.

La primera prueba se realiza con una relación agua cemento de 0.55 y sin aditivo, obteniendo un cono de Abrams de 2 cm, consistencia seca. Se deshecha la muestra, y además se observa que es necesario utilizar aditivo para mejorar la trabajabilidad del material.

Para la segunda muestra se eleva la relación agua cemento hasta el 0.6 y además se le añade un 1% de aditivo SKM 230, obteniendo un cono de Abrams de 16 cm, consistencia líquida. Consistencia muy líquida, exceso de agua y aditivo.

En la tercera muestra se reduce la relación de agua cemento a 0.5 y el aditivo SKM 230 hasta el 0.5%, obteniendo un cono de Abrams de 1 cm, consistencia seca. Por tanto, se deberá de añadir más agua y más aditivo.

Así pues, para la cuarta muestra se utiliza una relación agua cemento de 0.6 como en la muestra dos, pero con aditivo SKM 230 0.6%, obteniendo un cono de Abrams de 8.5 cm, consistencia blanda. Se procederá a bajar la relación agua cemento y añadir aditivo.

La quinta muestra se realiza reduciendo la relación agua cemento a 0.55 y utilizando más aditivo que en la muestra anterior, un 1% de aditivo SKM 230. Se obtiene un cono de Abrams de 6 cm, consistencia blanda. Para tratar de conseguir una consistencia entre plástica y blanda, de unos 5 cm en el cono de Abrams, la relación agua cemento se mantendrá y se reducirá la cantidad de aditivo

Finalmente, para la sexta muestra se mantiene la relación agua cemento de 0.55 y se reduce el aditivo SKM 230 hasta el 0.6%, obteniendo un cono de Abrams de 5 cm, consistencia plástica. Todos los datos obtenidos de las pruebas de dosificación se reflejaran en la tabla 31.

Prueba	Relación A/C	Aditivo	Cono
1	0.55	NO	2 cm
2	0.6	1%	16 cm
3	0.5	0.5%	1 cm
4	0.6	0.6%	8.5 cm
5	0.55	1%	6 cm
6	0.55	0.6%	5 cm

Tabla 31. Pruebas de dosificación

Después de realizar ensayos de las distintas muestras de hormigón que realizadas con diferentes relaciones agua/cemento y aditivos, la dosificación final será la obtenida en la tabla 32.

Dosificación Hormigón HA-30/P/20	
Relación a/c	0.55
Cemento	300 Kg/m ³
Agua	165 Kg/m ³
Árido 0/4	870 Kg/m ³
Árido 4/11	270 Kg/m ³
Árido 10/20	800 Kg/m ³
Aditivo SKM 230	0.6%

Tabla 32. Dosificación final del hormigón

5.3 Conclusiones

Teniendo en cuenta la disparidad de resultados en la caracterización de los materiales, se ha considerado un cono de Abrams de aproximadamente 5 cm, para obtener una trabajabilidad buena. Tras el proceso explicado previamente, se ha llegado a una relación agua cemento baja, casi la recomendada por el fabricante, pero con la utilización de aditivos en un porcentaje relativamente bajo. Se ha obtenido una dosificación universal para las amasadas de hormigón, pero se deberán de tener en cuenta otros factores en la planificación del estudio, como la corrección de agua y la granulometría final de cada amasada.

“Dicen que para conseguir tus propósitos hacen falta, inteligencia, valor y confianza en uno mismo, el verdadero reto es juntar las tres cosas al mismo tiempo.” (Julio Fernández)

6. CORRECCIÓN DE AGUA

Una vez analizado el punto anterior y debido a la importancia del agua en la realización del hormigón, se analizará en este apartado todos los cálculos realizados para la rectificación de la relación agua/cemento efectiva, para que no varíe ninguna amasada.

La relación agua/cemento se ha revisado según la norma UNE EN 206-1:2008, y ésta variará en cada amasada al tener cada material un diferente coeficiente de absorción de agua, por tanto, se rectificaran todas las amasadas, incluso el árido natural calizo. Se calculará la masa añadida y su coeficiente de absorción para obtener el agua necesaria para saturar el árido y que el hormigón tenga una relación agua/cemento efectiva del 0.55.

La granulometría gruesa 10/20 permanece igual en todas las amasadas, ya que no se dispone de residuos de este tamaño. En la granulometría media 4/8 en el caso de los residuos o 4/11 en caso del árido natural, se sustituye, en la medida de lo posible, el árido natural calizo por el residuo, en este estudio el porcentaje de sustitución en todas las amasadas será del 100%. La granulometría fina 0/4 se sustituye el porcentaje de restante que falta de la granulometría media hasta llegar al porcentaje de sustitución definido (14%, 20% y 30%).

Todos estos datos están recopilados en la siguiente tabla, con la cantidad de kilos necesarios de árido natural y residuo utilizados en cada amasada, así como el coeficiente de absorción de cada material para hallar el agua absorbida en cada amasada y poder rectificarla (tabla 33).

Corrección de agua/cemento efectiva										
Material	NAT			BAL		LH		SAN		Agua
Granulometría	10/20	4/11	0/4	4/8	0/4	4/8	0/4	4/8	0/4	Absorbida
Absorción %	1.22	0.25	0.43	8.93	6.28	18.31	15.76	1.83	0.69	(Litros)
Control	27.99	9.45	30.44	0	0	0	0	0	0	0.5
BAL 14%	27.99	0	30.38	9.45	0.06	9.45	0.06	9.45	0.06	1.32
BAL 20 %	27.99	0	26.31	9.45	4.13	9.45	4.13	9.45	4.13	1.56
BAL 30%	27.99	0	19.52	9.45	10.92	9.45	10.92	9.45	10.92	1.96
LH 14%	27.99	0	30.38	9.45	0.06	9.45	0.06	9.45	0.06	2.21
LH 20 %	27.99	0	26.31	9.45	4.13	9.45	4.13	9.45	4.13	2.84
LH 30 %	27.99	0	19.52	9.45	10.92	9.45	10.92	9.45	10.92	3.88
SAN 14%	27.99	0	30.38	9.45	0.06	9.45	0.06	9.45	0.06	0.65
SAN 20%	27.99	0	26.31	9.45	4.13	9.45	4.13	9.45	4.13	0.66
SAN 30%	27.99	0	19.52	9.45	10.92	9.45	10.92	9.45	10.92	0.67

Tabla 33. Corrección de agua

Una vez obtenida el agua absorbida en cada amasada por los áridos, se deberá sumar el agua efectiva que en todas las amasadas es de 5.78 litros. Por consiguiente, el agua total añadida es la suma del agua efectiva y la absorbida, la cual varía en cada amasada. La relación agua/cemento total de la amasada oscila entre 0.6, utilizada en la amasada control y el 0.92 perteneciente a la amasada que utilizada el residuo de ladrillo para sustituir el 30%, no obstante todas las amasadas mantienen una relación agua/cemento efectiva del 0.55 (Tabla 34).

	A/C efectiva	Agua efectiva (Litros)	Agua absorbida (l)	Agua total añadida (l)	A/C total en amasada
Control			0.5	6.27	0.6
BAL 14%			1.32	7,09	0.68
BAL 20 %			1.56	7,33	0.70
BAL 30%			1.96	7,73	0.74
LH 14%			2.21	7.99	0.76
LH 20 %	0.55	5.78	2.84	8.61	0.82
LH 30 %			3.88	9.65	0.92
SAN 14%			0.65	6.42	0.61
SAN 20%			0.66	6.43	0.61
SAN 30%			0.67	6.45	0.61

Tabla 34. Calculo de agua en cada amasada

6.1 Conclusiones

Es de gran importancia los cálculos de la absorción de agua en los áridos, para mantener una consistencia homogénea en todas las amasadas sin variar la trabajabilidad en las amasadas. El agua absorbida se añadirá a los áridos que se utilicen antes de cada amasada para saturar los poros y así no variar la relación agua/cemento efectiva de 0.55, hay grandes variaciones en la relación agua/cemento total desde 0.6 (amasada control) a 0.92 (amasada LH 30%), esto puede repercutir en la resistencia y porosidad final del hormigón.

“Hay que saber dónde vas sin olvidar de dónde vienes, no hay final sin inicio.”

7. DESARROLLO DEL HORMIGÓN RECICLADO

7.1 Introducción

Una vez analizados los puntos anteriores, se procede a desarrollar el hormigón reciclado.

La dosificación del hormigón se ha obtenido en el apartado anterior de ensayos preliminares del hormigón (tabla 32), en ella se han tenido en cuenta todos los resultados de los ensayos de los áridos y la recomendación del fabricante; considerando lo anterior se ha optado por una consistencia plástica con un cono de Abrams de 5 cm. Otro aspecto importante en el desarrollo del hormigón reciclado es la relación agua/cemento efectiva calculada para cada amasada en el apartado anterior (Corrección de agua, tablas 33 y 34).

7.2 Sustitución residuos

La granulometría gruesa 10/20 permanece igual en todas las amasadas, ya que no se dispone de residuos de este tamaño para una sustitución homogénea. En la granulometría media 4/8 en el caso de los residuos o 4/11 en caso del árido natural, se sustituye todo lo posible el árido natural calizo por los residuos en un porcentaje determinado en cada amasada. En este estudio el porcentaje de sustitución será del 100% en todas las amasadas. La granulometría fina 0/4 se sustituye el porcentaje restante, hasta llegar al porcentaje de sustitución definido. La composición del árido en las amasadas viene detallada en la siguiente tabla (tabla 35), valores expresados en kilos.

Denominación	Árido fino 0/4		Árido medio 4/11		Árido grueso 10/20	
	Natural	Residuo	Natural	Residuo	Natural	Residuo
Control	30.44	0	9.45	0	27.99	0
BAL 14%	30.38	0.06	0	9.45	27.99	0
BAL 20%	26.31	4.13	0	9.45	27.99	0
BAL 30%	19.52	10.92	0	9.45	27.99	0
LH 14%	30.38	0.06	0	9.45	27.99	0
LH 20%	26.31	4.13	0	9.45	27.99	0
LH 30%	19.52	10.92	0	9.45	27.99	0
SAN 14%	30.38	0.06	0	9.45	27.99	0
SAN 20%	26.31	4.13	0	9.45	27.99	0
SAN 30%	19.52	10.92	0	9.45	27.99	0

Tabla 35. Sustitución de áridos reciclados en amasadas

7.3 Composiciones granulométricas utilizadas

Una vez sustituido el árido natural por el respectivo porcentaje de residuo en cada amasada, se detalla la granulometría final (tablas 36 a 45), el tamaño máximo del árido y el módulo granulométrico. Los resultados (salvo la amasada control que solo está compuesta por árido calizo natural) al estar compuesto por dos áridos, un porcentaje de árido natural y otro porcentaje de residuo (14%, 20% y 30%), se ha reflejado el respectivo porcentaje retenido acumulado de cada granulometría, obteniendo la granulometría final de cada amasada de hormigón.

En la siguiente tabla se expresa la granulometría en cada tamiz del árido calizo natural en el amasado control, el tamaño máximo del árido y el módulo granulométrico.

Control				
Tamiz	retenido	% retenido	% retenido acumulado	% que pasa
125,00	0	0%	0%	100%
63,00	0	0%	0%	100%
31,50	0	0%	0%	100%
16,00	1202,59	27%	27%	73%
8,00	1321	29%	56%	44%
4,00	646,26	14%	70%	30%
2,00	285,33	6%	76%	24%
1,00	284,08	6%	82%	18%
0,50	202,38	4%	87%	13%
0,25	175,01	4%	91%	9%
0,125	188,1	4%	95%	5%
0,063	105,47	2%	97%	3%
Fondo	123,05	3%	100%	0%
Total	4533,27	100%		
Tamaño máximo árido			D=	31,50
Módulo granulométrico			m=	5,84

Tabla 36. Granulometría final amasada control

En la siguiente tabla se expresa el porcentaje de árido retenido en cada tamiz y separado por las tres granulometrías, en la tabla se refleja el árido natural con su respectiva sustitución del 14% de residuo de baldosas. Obteniendo la granulometría final de la amasada (BAL 14%), el tamaño máximo del árido y el módulo granulométrico.

BAL 14%				
	Fina 0/4	Media 4/11	Gruesa 10/20	TOTAL
Tamiz	% retenido acumulado	% retenido acumulado	% retenido acumulado	
125,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
63,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
31,50	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
16,00	0,00%	0,00%	38,34%	38,34%
8,00	0,00%	4,90%	41,21%	46,11%
4,00	12,67%	12,15%	41,21%	66,03%
2,00	19,30%	12,85%	41,21%	73,37%
1,00	26,05%	13,04%	41,21%	80,30%
0,50	30,86%	13,17%	41,21%	85,24%
0,25	35,01%	13,29%	41,21%	89,51%
0,125	39,46%	13,42%	41,21%	94,09%
0,063	41,93%	13,64%	41,23%	96,80%
Tamaño máximo árido			D=	31,50
Módulo granulométrico			m=	5,73

Tabla 37. Granulometría final amasada BAL 14%

En la siguiente tabla se expresa el porcentaje de árido retenido en cada tamiz y separado por las tres granulometrías, en la tabla se refleja el árido natural con su respectiva sustitución del 20% de residuo de baldosas. Obteniendo la granulometría final de la amasada (BAL 20%), el tamaño máximo del árido y el módulo granulométrico.

BAL 20%				
	Fina 0/4	Media 4/11	Gruesa 10/20	TOTAL
Tamiz	% retenido acumulado	% retenido acumulado	% retenido acumulado	
125,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
63,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
31,50	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
16,00	0,00%	0,00%	38,34%	38,34%
8,00	0,00%	4,90%	41,21%	46,11%
4,00	10,97%	12,15%	41,21%	64,33%
2,00	19,26%	12,85%	41,21%	73,32%
1,00	26,64%	13,04%	41,21%	80,89%
0,50	31,68%	13,17%	41,21%	86,06%
0,25	35,71%	13,29%	41,21%	90,21%
0,125	39,78%	13,42%	41,21%	94,41%
0,063	42,09%	13,64%	41,23%	96,97%
Tamaño máximo árido			D=	31,50
Módulo granulométrico			m=	5,74

Tabla 38. Granulometría final amasada BAL 20%

En la siguiente tabla se expresa el porcentaje de árido retenido en cada tamiz y separado por las tres granulometrías, en la tabla se refleja el árido natural con su respectiva sustitución del 30% de residuo de baldosas. Obteniendo la granulometría final de la amasada (BAL 30%), el tamaño máximo del árido y el módulo granulométrico.

BAL 30%				
	Fina 0/4	Media 4/11	Gruesa 10/20	TOTAL
Tamiz	% retenido acumulado	% retenido acumulado	% retenido acumulado	
125,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
63,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
31,50	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
16,00	0,00%	0,00%	38,34%	38,34%
8,00	0,00%	4,90%	41,21%	46,11%
4,00	8,14%	12,15%	41,21%	61,50%
2,00	19,18%	12,85%	41,21%	73,24%
1,00	27,63%	13,04%	41,21%	81,88%
0,50	33,05%	13,17%	41,21%	87,43%
0,25	36,87%	13,29%	41,21%	91,36%
0,125	40,31%	13,42%	41,21%	94,94%
0,063	42,37%	13,64%	41,23%	97,25%
Tamaño máximo árido			D=	31,50
Módulo granulométrico			m=	5,75

Tabla 39. Granulometría final amasada BAL 30%

En la siguiente tabla se expresa el porcentaje de árido retenido en cada tamiz y separado por las tres granulometrías, en la tabla se refleja el árido natural con su respectiva sustitución del 14% de residuo de ladrillo. Obteniendo la granulometría final de la amasada (LH 14%), el tamaño máximo del árido y el módulo granulométrico.

LH 14%				
	Fina 0/4	Media 4/11	Gruesa 10/20	TOTAL
Tamiz	% retenido acumulado	% retenido acumulado	% retenido acumulado	
125,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
63,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
31,50	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
16,00	0,00%	0,00%	38,34%	38,34%
8,00	0,00%	3,19%	41,21%	44,40%
4,00	12,67%	13,49%	41,21%	67,37%
2,00	19,31%	13,86%	41,21%	74,38%
1,00	26,05%	13,88%	41,21%	81,14%
0,50	30,87%	13,89%	41,21%	85,97%
0,25	35,02%	13,90%	41,21%	90,13%
0,125	39,46%	13,90%	41,21%	94,58%
0,063	41,93%	13,92%	41,23%	97,08%
Tamaño máximo árido			D=	31,50
Módulo granulométrico			m=	5,76

Tabla 40. Granulometría final amasada LH 14%

En la siguiente tabla se expresa el porcentaje de árido retenido en cada tamiz y separado por las tres granulometrías, en la tabla se refleja el árido natural con su respectiva sustitución del 20% de residuo de ladrillo. Obteniendo la granulometría final de la amasada (LH 20%), el tamaño máximo del árido y el módulo granulométrico.

LH 20%				
	Fina 0/4	Media 4/11	Gruesa 10/20	TOTAL
Tamiz	% retenido acumulado	% retenido acumulado	% retenido acumulado	
125,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
63,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
31,50	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
16,00	0,00%	0,00%	38,34%	38,34%
8,00	0,00%	3,19%	41,21%	44,40%
4,00	10,97%	13,49%	41,21%	65,67%
2,00	19,60%	13,86%	41,21%	74,67%
1,00	27,23%	13,88%	41,21%	82,32%
0,50	32,08%	13,89%	41,21%	87,18%
0,25	35,94%	13,90%	41,21%	91,05%
0,125	39,93%	13,90%	41,21%	95,04%
0,063	42,25%	13,92%	41,23%	97,40%
Tamaño máximo árido			D=	31,50
Módulo granulométrico			m=	5,79

Tabla 41. Granulometría final amasada LH 20%

En la siguiente tabla se expresa el porcentaje de árido retenido en cada tamiz y separado por las tres granulometrías, en la tabla se refleja el árido natural con su respectiva sustitución del 30% de residuo de ladrillo. Obteniendo la granulometría final de la amasada (LH 30%), el tamaño máximo del árido y el módulo granulométrico.

LH 30%				
	Fina 0/4	Media 4/11	Gruesa 10/20	TOTAL
Tamiz	% retenido acumulado	% retenido acumulado	% retenido acumulado	
125,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
63,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
31,50	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
16,00	0,00%	0,00%	38,34%	38,34%
8,00	0,00%	3,19%	41,21%	44,40%
4,00	8,14%	13,49%	41,21%	62,84%
2,00	20,08%	13,86%	41,21%	75,15%
1,00	29,20%	13,88%	41,21%	84,29%
0,50	34,10%	13,89%	41,21%	89,20%
0,25	37,47%	13,90%	41,21%	92,58%
0,125	40,70%	13,90%	41,21%	95,82%
0,063	42,79%	13,92%	41,23%	97,94%
Tamaño máximo árido			D=	31,50
Módulo granulométrico			m=	5,83

Tabla 42. Granulometría final amasada LH 30%

En la siguiente tabla se expresa el porcentaje de árido retenido en cada tamiz y separado por las tres granulometrías, en la tabla se refleja el árido natural con su respectiva sustitución del 14% de residuo de cerámica sanitaria. Obteniendo la granulometría final de la amasada (SAN 14%), el tamaño máximo del árido y el módulo granulométrico.

SAN 14%				
	Fina 0/4	Media 4/11	Gruesa 10/20	TOTAL
Tamiz	% retenido acumulado	% retenido acumulado	% retenido acumulado	
125,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
63,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
31,50	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
16,00	0,00%	0,00%	38,34%	38,34%
8,00	0,00%	6,12%	41,21%	47,33%
4,00	12,67%	13,17%	41,21%	67,04%
2,00	19,30%	13,89%	41,21%	74,40%
1,00	26,05%	13,91%	41,21%	81,17%
0,50	30,86%	13,91%	41,21%	85,98%
0,25	35,02%	13,91%	41,21%	90,14%
0,125	39,46%	13,92%	41,21%	94,59%
0,063	41,93%	13,92%	41,23%	97,08%
Tamaño máximo árido			D=	31,50
Módulo granulométrico			m=	5,79

Tabla 43. Granulometría final amasada SAN 14%

En la siguiente tabla se expresa el porcentaje de árido retenido en cada tamiz y separado por las tres granulometrías, en la tabla se refleja el árido natural con su respectiva sustitución del 20% de residuo de cerámica sanitaria. Obteniendo la granulometría final de la amasada (SAN 20%), el tamaño máximo del árido y el módulo granulométrico.

SAN 20%				
	Fina 0/4	Media 4/11	Gruesa 10/20	TOTAL
Tamiz	% retenido acumulado	% retenido acumulado	% retenido acumulado	
125,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
63,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
31,50	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
16,00	0,00%	0,00%	38,34%	38,34%
8,00	0,00%	6,12%	41,21%	47,33%
4,00	10,97%	13,17%	41,21%	65,35%
2,00	19,05%	13,89%	41,21%	74,15%
1,00	26,89%	13,91%	41,21%	82,01%
0,50	31,88%	13,91%	41,21%	87,00%
0,25	35,83%	13,91%	41,21%	90,95%
0,125	39,89%	13,92%	41,21%	95,02%
0,063	42,18%	13,92%	41,23%	97,33%
Tamaño máximo árido			D=	31,50
Módulo granulométrico			m=	5,80

Tabla 44. Granulometría final amasada SAN 20%

En la siguiente tabla se expresa el porcentaje de árido retenido en cada tamiz y separado por las tres granulometrías, en la tabla se refleja el árido natural con su respectiva sustitución del 30% de residuo de cerámica sanitaria. Obteniendo la granulometría final de la amasada (SAN 30%), el tamaño máximo del árido y el módulo granulométrico.

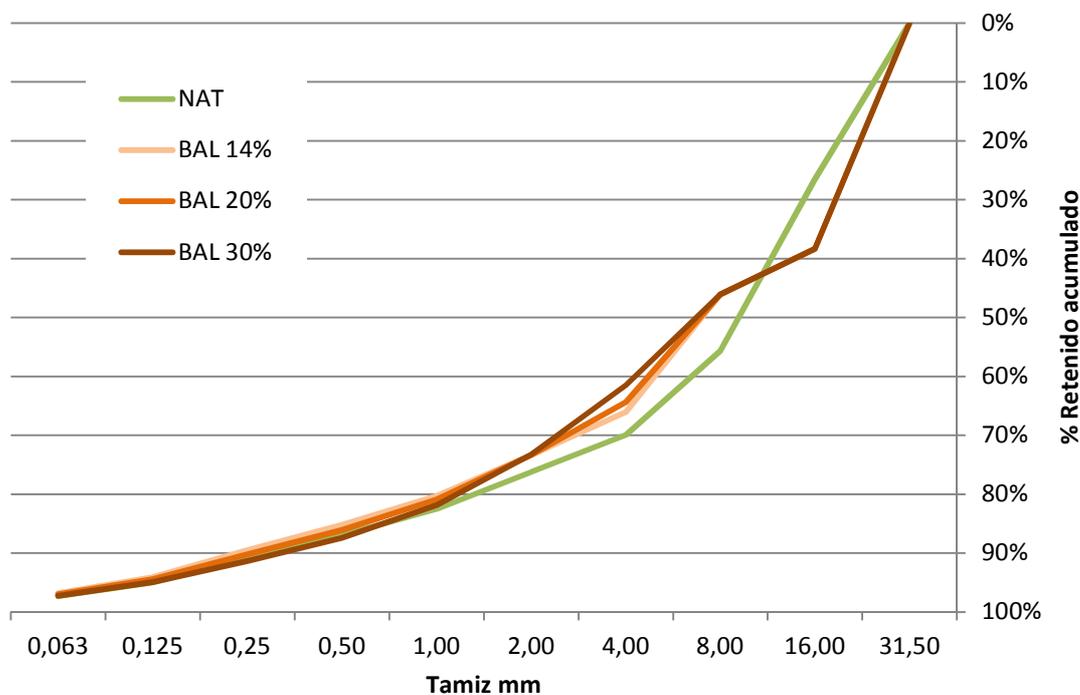
SAN 30%				
	Fina 0/4	Media 4/11	Gruesa 10/20	TOTAL
Tamiz	% retenido acumulado	% retenido acumulado	% retenido acumulado	
125,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
63,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
31,50	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
16,00	0,00%	0,00%	38,34%	38,34%
8,00	0,00%	6,12%	41,21%	47,33%
4,00	8,14%	13,17%	41,21%	62,52%
2,00	18,64%	13,89%	41,21%	73,74%
1,00	28,29%	13,91%	41,21%	83,41%
0,50	33,58%	13,91%	41,21%	88,70%
0,25	37,18%	13,91%	41,21%	92,31%
0,125	40,61%	13,92%	41,21%	95,74%
0,063	42,60%	13,92%	41,23%	97,75%
Tamaño máximo árido			D=	31,50
Módulo granulométrico			m=	5,82

Tabla 45. Granulometría final amasada SAN 30%

7.3.1 Comparativa de resultados

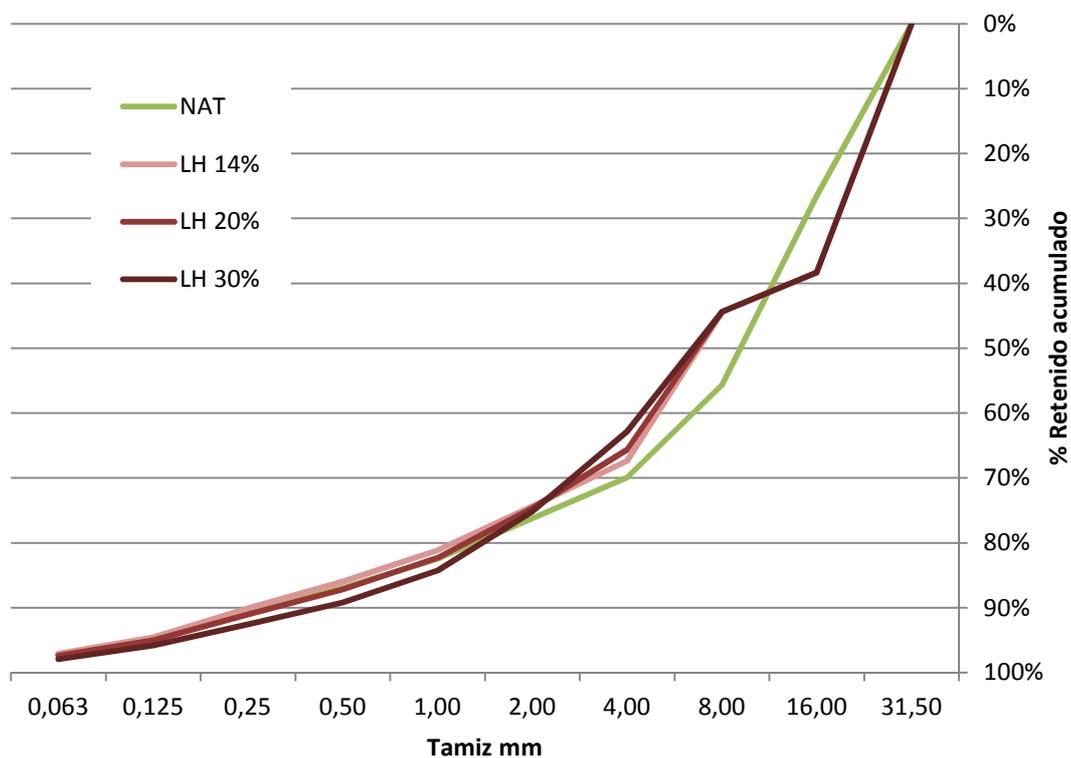
Las siguientes gráficas comparan los resultados obtenidos en la granulometría de cada amasada; primero se compara la amasada de control, que es de árido calizo natural en su totalidad, con cada residuo por separado con sus respectivas sustituciones de 14%, 20% y 30%. A continuación, mediante gráficas se muestra la comparación entre el árido natural y con la sustitución de los residuos del 14%, otra con el del 20% y otra con el 30%.

En la siguiente gráfica se expresa el porcentaje de árido retenido en cada tamiz, se compara el amasado control compuesto por árido natural calizo a las amasadas con sustituciones de 14%, 20% y 30% de residuo de baldosas.



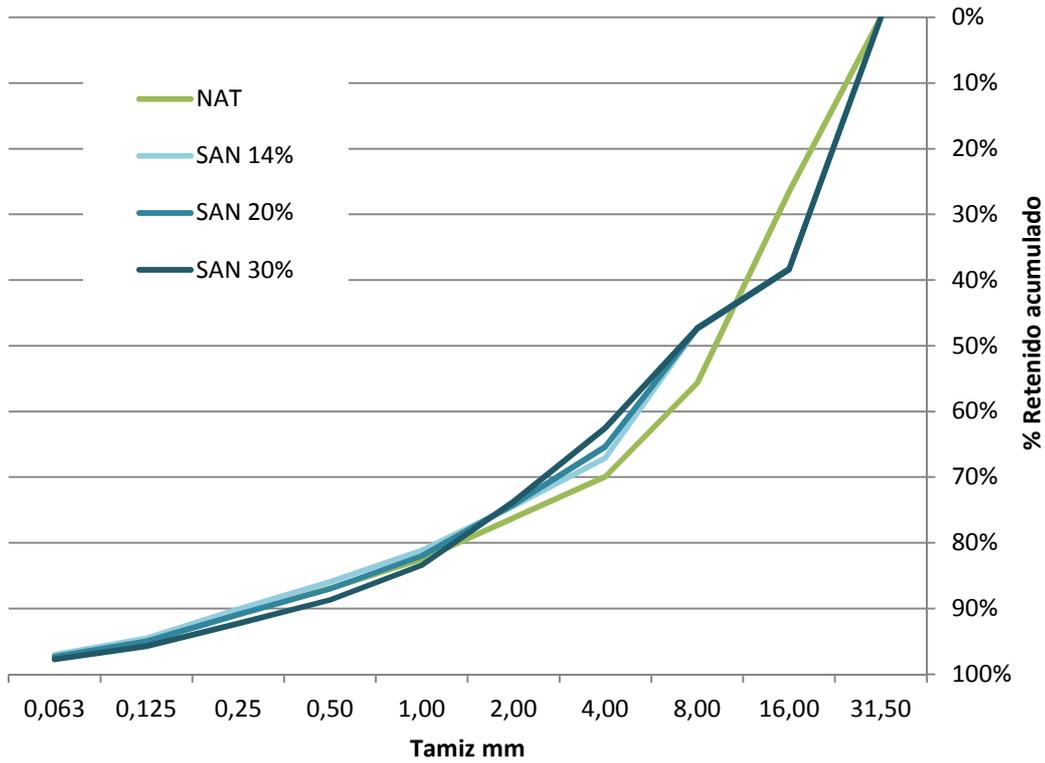
Gráfica 13. Granulometría final control y todas las de baldosas

En la siguiente gráfica se expresa el porcentaje de árido retenido en cada tamiz, se compara el amasado control compuesto por árido natural calizo a las amasadas con sustituciones de 14%, 20% y 30% de residuo de ladrillo.



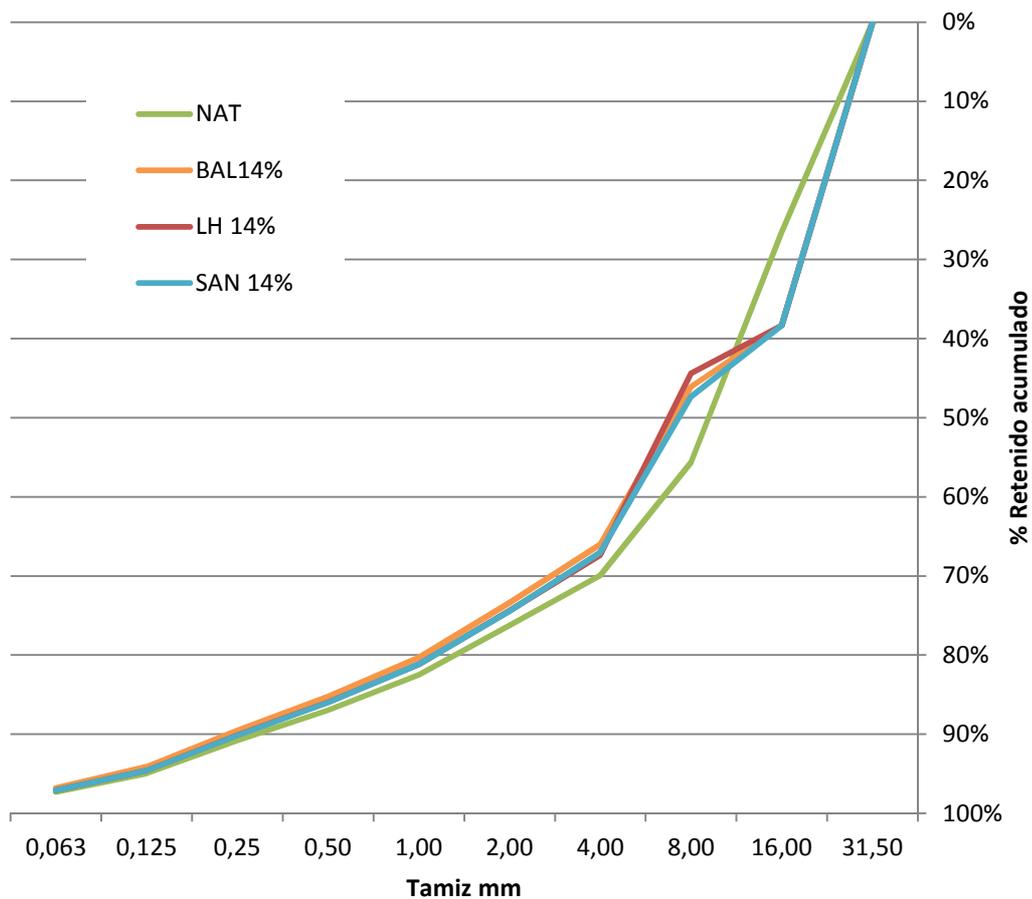
Gráfica 14. Granulometría final control y todas las de ladrillo

En la siguiente gráfica se expresa el porcentaje de árido retenido en cada tamiz, se compara el amasado control compuesto por árido natural calizo a las amasadas con sustituciones de 14%, 20% y 30% de residuo de cerámica sanitaria.



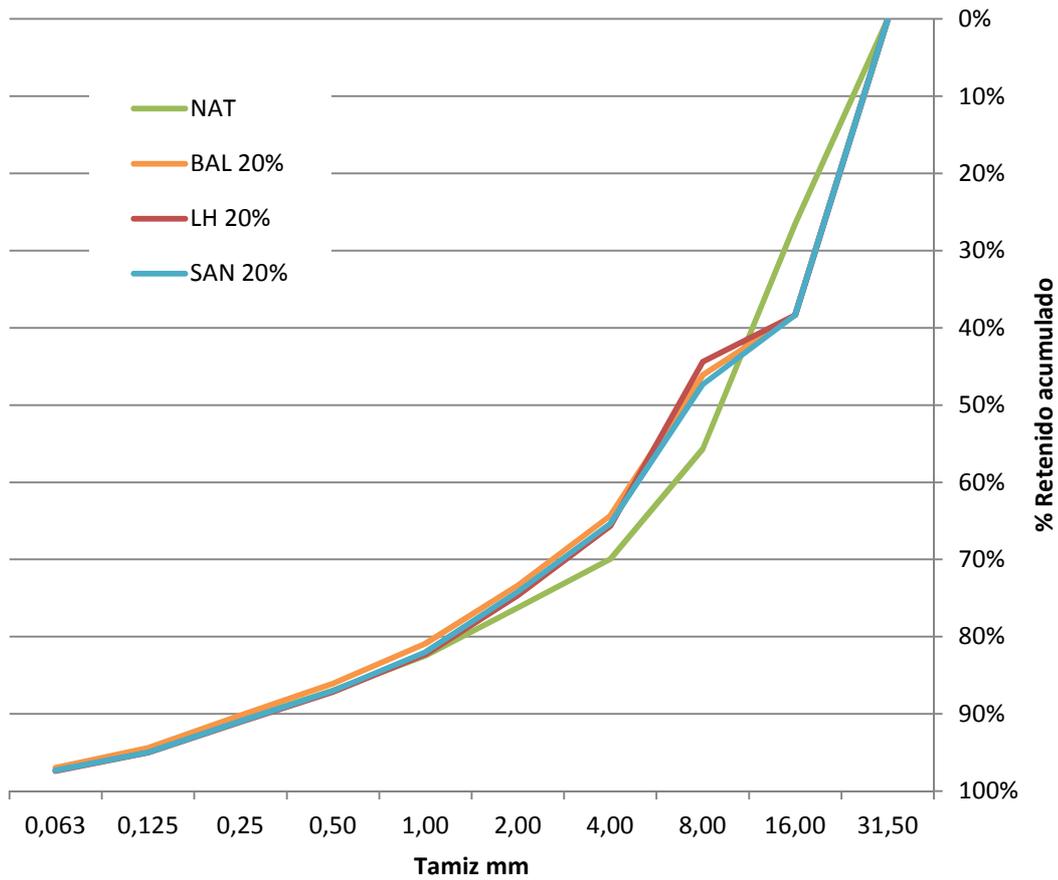
Gráfica 15. Granulometría final control y todas las de sanitario

En la siguiente gráfica se expresa el porcentaje de árido retenido en cada tamiz, se compara el amasado control compuesto por árido natural calizo a las amasadas con sustitución de 14% de residuos de baldosas, ladrillo y cerámica sanitaria.



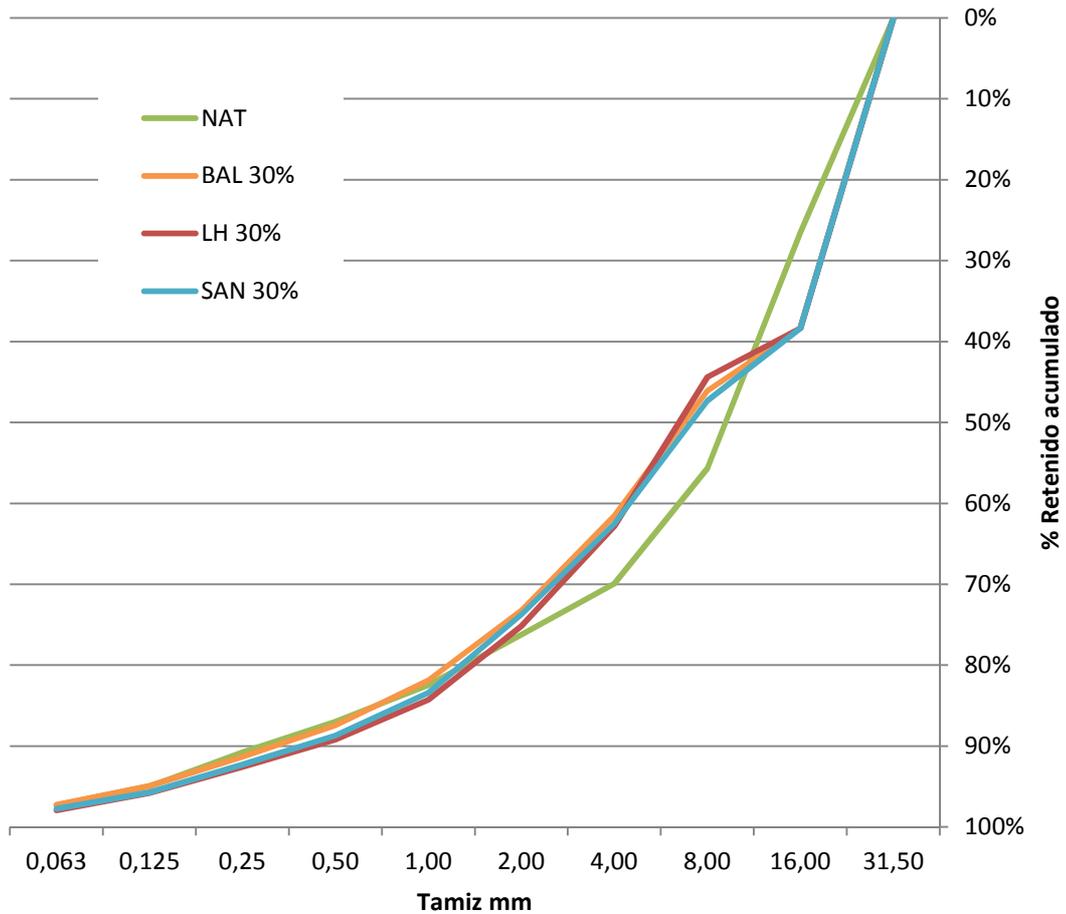
Gráfica 16. Granulometría final control y todas las sustituciones de 14%

En la siguiente gráfica se expresa el porcentaje de árido retenido en cada tamiz, se compara el amasado control compuesto por árido natural calizo a las amasadas con sustitución de 20% de residuos de baldosas, ladrillo y cerámica sanitaria.



Gráfica 17. Granulometría final control y todas las sustituciones de 20%

En la siguiente gráfica se expresa el porcentaje de árido retenido en cada tamiz, se compara el amasado control compuesto por árido natural calizo a las amasadas con sustitución de 30% de residuos de baldosas, ladrillo y cerámica sanitaria.



Gráfica 18. Granulometría final control y todas las sustituciones de 30%

7.4 Procedimiento amasado

Las amasadas se realizarán según la Norma Inglesa BS 1881-125:2013.

En primer lugar se añade el agua absorbida a los áridos utilizados para saturar los poros superficiales y se deja durante 5 minutos para que se sature toda la muestra.

Se vierte en la amasadora la mitad del árido grueso 10/20, la mitad del árido medio 4/11, todo el árido fino 0/4, la otra mitad del árido medio 4/11 y la otra mitad del árido grueso 10/20.

Una vez vertido todo el árido por tandas en la amasadora, ésta se enciende para que empiece a mezclar todo el árido, a los 30 segundos de iniciar el proceso, se le añade la mitad del agua durante 15 segundos y se deja mezclar durante 135 segundos, después se detiene durante 5 minutos. A continuación, se vuelve a encender y se vierte todo el cemento durante 30 segundos, luego se añade la otra mitad de agua durante 30 segundos y se deja mezclando otros 3 minutos (Fig.16a).

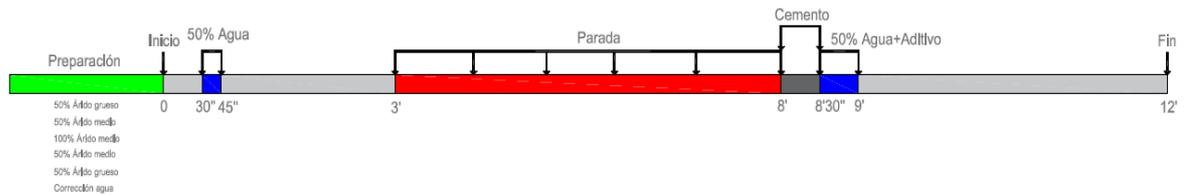


Fig. 16a

7.5 Fabricación de las probetas

El llenado y curado de las probetas se realiza según norma UNE EN 12390-2:2009.

Se vierte el hormigón en las probetas en tres tandas, en cada tanda se realizan 25 golpes con la barra de compactar para eliminar el aire ocluido en el hormigón. Con un mazo de goma se golpea el lateral de la probeta, para acabar de eliminar las burbujas del hormigón y se tapan con arpillera húmeda dejándose reposar 24 horas a temperatura ambiente dentro del laboratorio (Fig. 17).



Fig. 17

7.6 Caracterización de las probetas

Una vez realizada la amasada de hormigón, según la norma UNE EN 12350-2:2009, se realiza el ensayo de consistencia del hormigón con el cono de Abrams (Fig. 18). Una vez reposada la probeta 24 horas, se procede a desmoldar según norma UNE EN 12390-2:2009, se marca con su correspondiente nomenclatura y fecha de amasado, se deja en la cámara a una humedad de 98% y 20 grados de temperatura uniformes. Se determinan dos intervalos de rotura 7 y 28 días de curado, en cada uno de ellos se procede a la rotura de dos probetas. Previo a la rotura, éstas se refrentan con una mezcla de azufre y arena fina para que ambas caras de la probeta estén planas (Fig. 19).

Para la rotura de las probetas, la maquina utilizada debe cumplir las exigencias de la norma UNE EN 12390-4:2001, y el ensayo se realizara según norma UNE EN 12390-3:2009 (Fig. 20).

Se revisara que la forma de rotura de las probetas cumpla con las formas aceptadas por la norma UNE EN 12350-2:2009, para que el ensayo pueda computarse como correcto (Fig. 21).



Fig. 18



Fig. 19



Fig. 20

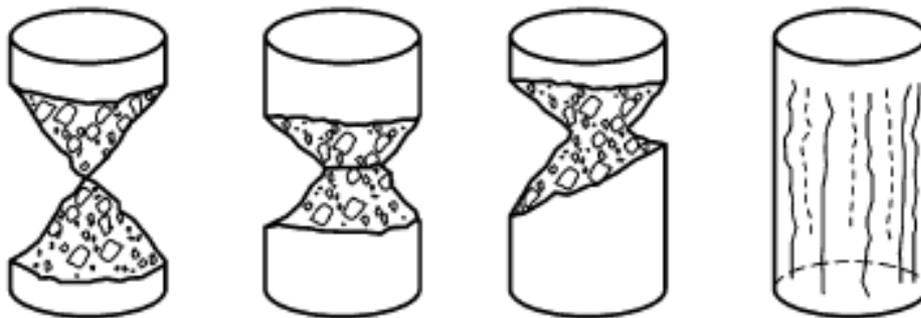


Fig. 21. Fuente: EHE-08

7.7 Conclusiones

La planificación es de gran importancia para llevar a cabo el estudio, en ella se detallan como y cuando llevar a cabo el amasado del hormigón, así como las sustituciones de árido natural calizo por residuos. Para evitar errores, las amasadas se realizaran todas de la misma forma y con una serie de pautas determinadas por una norma, en este caso se ha escogido la norma inglesa previamente indicada por ser la que mejor definía y se adaptaba a este estudio.

*“No es el conocimiento, sino el acto de aprendizaje,
y no la posesión, sino el acto de llegar allí, que
concede el mayor disfrute.” (Carl Friedrich Gauss)*

8. RESULTADOS DEL ESTUDIO

8.1 Introducción

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en las amasadas; por cada amasada, se han realizado dos conos de Abrams, cuya media será utilizada para determinar la consistencia, dos probetas para romper a los 7 días y otras dos a los 28 días. Las probetas se rompen mediante el ensayo de compresión, debido a que solo se realizan dos probetas el resultado expresado será la media de ambas y la desviación típica, no se realizara la resistencia característica a causa de tener solo dos muestras para comparar. Para una mayor homogeneización se han realizado dos amasadas de control con el árido calizo natural en diferentes momentos del estudio, permitiendo tener un mayor muestreo y menor dispersión de los resultados a controlar.

8.2 Trabajabilidad del hormigón

Una vez realizada la amasada y con el hormigón fresco, según la norma UNE EN 12350-2:2009 (Tabla 46), se procede a la realización de dos conos de Abrams por cada amasada de hormigón, se reflejaran los resultados de la media de ambos conos y el tipo de consistencia (Tabla 47).

Tipo de consistencia	Asentamiento (Cm)	Tolerancia (Cm)
Seca	0-2	±0
Plástica	3-5	±1
Blanda	6-9	±1
Fluida	10-15	±2
Líquida	16-20	±2

Tabla 46. Tipos de consistencia

Designación	Cono Abrams (Cm)	Tipo de consistencia
Control 1	5	Plástica
Control 2	5	Plástica
BAL 14%	5	Plástica
BAL 20%	4	Plástica
BAL 30%	3	Plástica
LH 14%	5	Plástica
LH 20%	5	Plástica
LH 30%	4	Plástica
SAN 14%	4.5	Plástica
SAN 20%	5	Plástica
SAN 30%	3.5	Plástica

Tabla 47. Consistencia de las amasadas

8.3 Resistencia a compresión del hormigón

Se reflejan los resultados de la rotura de probetas de hormigón a 7 días desde su amasado, curadas en una cámara a 20 grados y 98% de humedad. La Tabla 48 detalla la resistencia a compresión y desviación de los resultados de una misma amasada.

Se desestiman los resultados obtenidos en la probeta de control 1, debido a un resultado anómalo en la rotura de la probeta, ésta no computa en el resultado final.

Designación	Rotura (Días)	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)	Resistencia media (MPa)	Desviación
Control 1	7	634	35.88	-----	-----
Control 1		542.5	30.7		
Control 2	7	551.5	31.21	31.51	0.99
Control 2		576.4	32.62		
BAL 14%	7	595.1	33.68	33.25	0.61
BAL 14%		579.9	32.82		
BAL 20%	7	575,4	32,56	33.75	1.68
BAL 20%		617,3	34,93		
BAL 30%	7	555	31,41	31.36	0.08
BAL 30%		553,2	31,3		
LH 14%	7	489,6	27,71	27.57	0.21
LH 14%		484,5	27,42		
LH 20%	7	473,3	26,78	27.70	1.29
LH 20%		505,7	28,61		
LH 30%	7	452,5	25,61	25.71	0.13
LH 30%		455,9	25,8		
SAN 14%	7	540,2	30,57	31.37	1.13
SAN 14%		568,5	32,17		
SAN 20%	7	536,7	30,37	30.40	0.04
SAN 20%		537,6	30,42		
SAN 30%	7	543,2	30,74	31.02	0.39
SAN 30%		552,9	31,29		

Tabla 48. Resistencia a compresión del hormigón a 7 días

Se reflejan los resultados de la rotura de probetas de hormigón a 28 días desde su amasado, curadas en una cámara a 20 grados y 98% de humedad. Se detallan la resistencia a compresión y desviación de los resultados en la Tabla 49.

No se desestima ningún resultado, ya que todos han sido obtenidos correctamente según el procedimiento marcado, por lo tanto todos los resultados computaran.

Designación	Rotura (Días)	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)	Resistencia media (MPa)	Desviación
Control 1	28	688,8	38,98	37.80	1.79
Control 1		701,2	39,68		
Control 2	28	639,3	36,18	38.51	0.64
Control 2		642,4	36,35		
BAL 14%	28	688,5	38,96	40.21	0.35
BAL 14%		672,5	38,06		
BAL 20%	28	714,9	40,46	38.25	0.51
BAL 20%		706,2	39,96		
BAL 30%	28	669,5	37,89	33.86	0.60
BAL 30%		682,2	38,61		
LH 14%	28	590,7	33,43	34.44	0.11
LH 14%		605,9	34,28		
LH 20%	28	609,9	34,51	33.62	1.53
LH 20%		607,2	34,36		
LH 30%	28	574,9	32,53	36.58	0.59
LH 30%		613,2	34,7		
SAN 14%	28	639,1	36,16	35.72	0.37
SAN 14%		653,8	36,99		
SAN 20%	28	626,5	35,45	35.62	1.07
SAN 20%		635,8	35,98		
SAN 30%	28	616,1	34,86	35.62	1.07
SAN 30%		643	36,38		

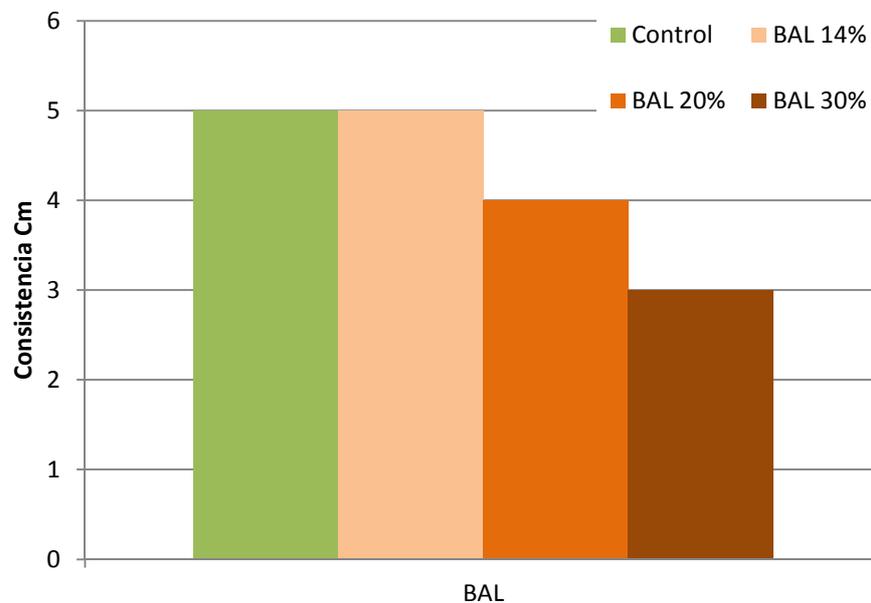
Tabla 49. Resistencia a compresión del hormigón a 28 días

8.4 Comparativa resultados

8.4.1 Trabajabilidad del hormigón

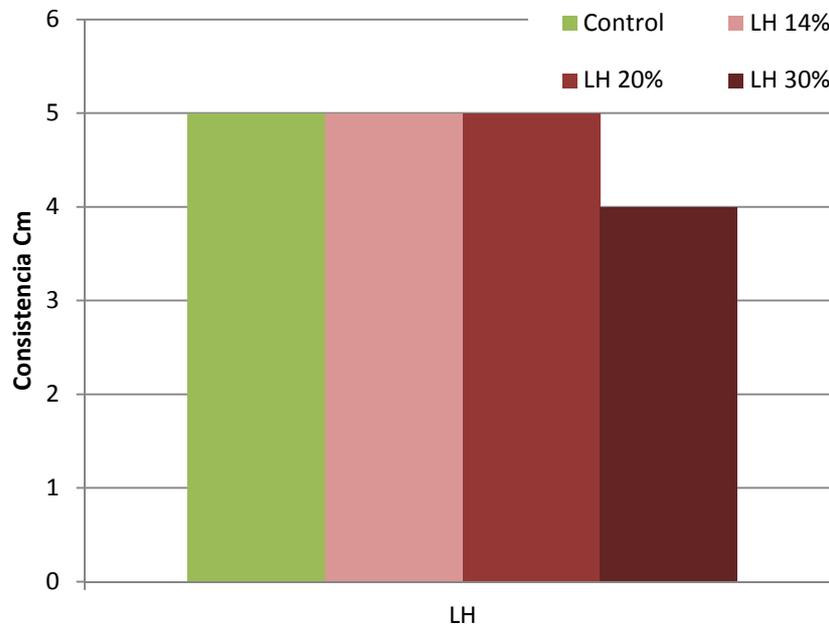
Se procede a mostrar las comparaciones de la trabajabilidad del material, mediante los resultados obtenidos en el cono de Abrams. Se comparan los resultados obtenidos de dos formas distintas, el control con los tres porcentajes de sustitución del residuo utilizado y por otra parte el control con cada porcentaje de sustitución 14%,20% y 30 %, por separado.

En la siguiente gráfica se expresa la consistencia en el cono de Abrams, se compara el amasado control compuesto por árido natural calizo a las amasadas con sustitución 14%, 20% y 30% de residuos de baldosas.



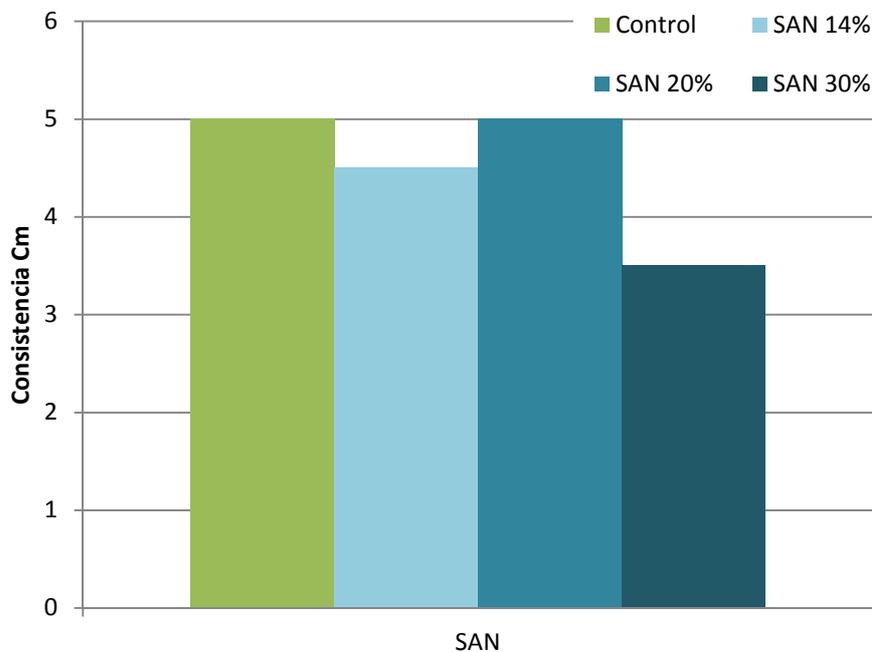
Gráfica 19. Consistencia, comparativa amasada control con todas las de baldosas

En la siguiente gráfica se expresa la consistencia en el cono de Abrams, se compara el amasado control compuesto por árido natural calizo a las amasadas con sustitución 14%, 20% y 30% de residuos de ladrillo.



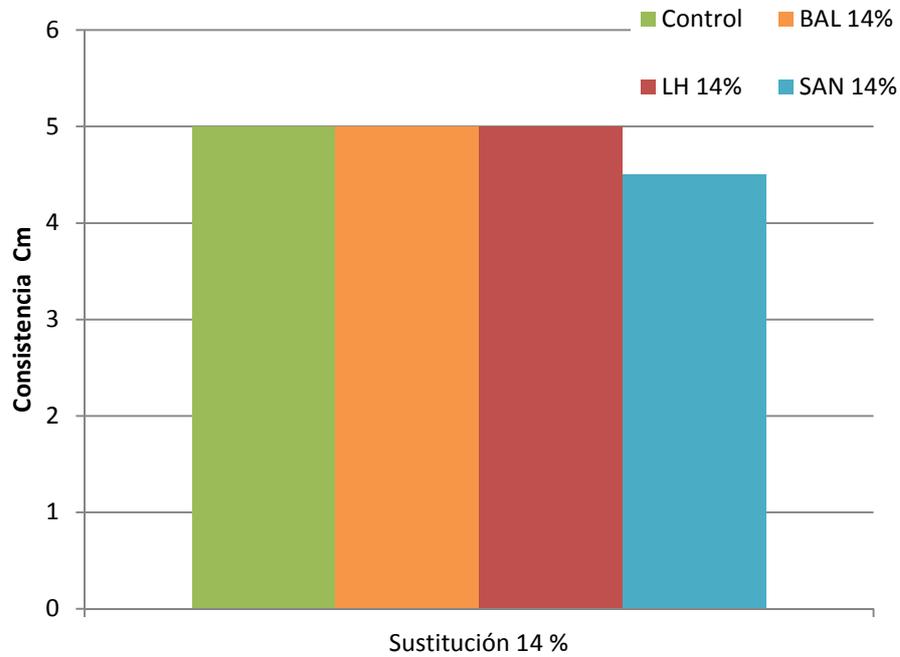
Gráfica 20. Consistencia, comparativa amasada control con todas las de ladrillo

En la siguiente gráfica se expresa la consistencia en el cono de Abrams, se compara el amasado control compuesto por árido natural calizo a las amasadas con sustitución 14%, 20% y 30% de residuos de cerámica sanitaria.



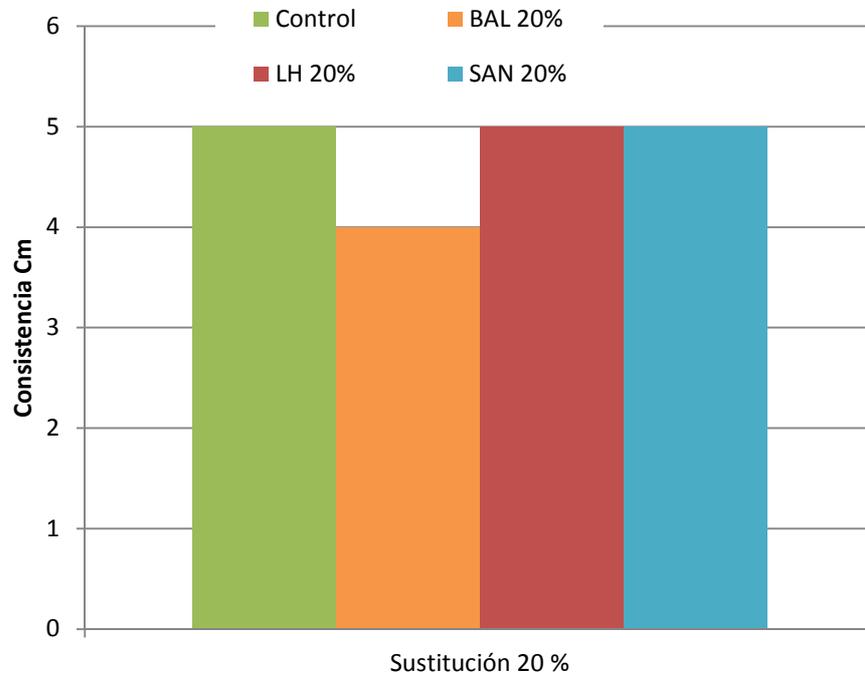
Gráfica 21. Consistencia, comparativa amasada control con todas las de sanitario

En la siguiente gráfica se expresa la consistencia en el cono de Abrams, se compara el amasado control compuesto por árido natural calizo a las amasadas con sustitución de 14% de residuos de baldosas, ladrillo y cerámica sanitaria.



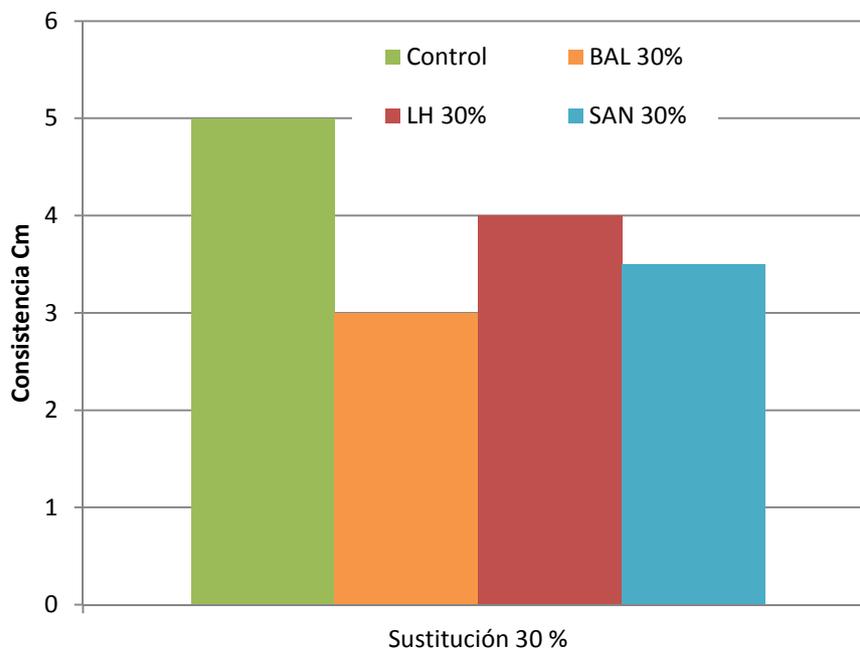
Gráfica 22. Consistencia, comparativa amasada control con sustituciones del 14%

En la siguiente gráfica se expresa la consistencia en el cono de Abrams, se compara el amasado control compuesto por árido natural calizo a las amasadas con sustitución de 20% de residuos de baldosas, ladrillo y cerámica sanitaria.



Gráfica 23. Consistencia, comparativa amasada control con sustituciones del 20%

En la siguiente gráfica se expresa la consistencia en el cono de Abrams, se compara el amasado control compuesto por árido natural calizo a las amasadas con sustitución de 30% de residuos de baldosas, ladrillo y cerámica sanitaria.

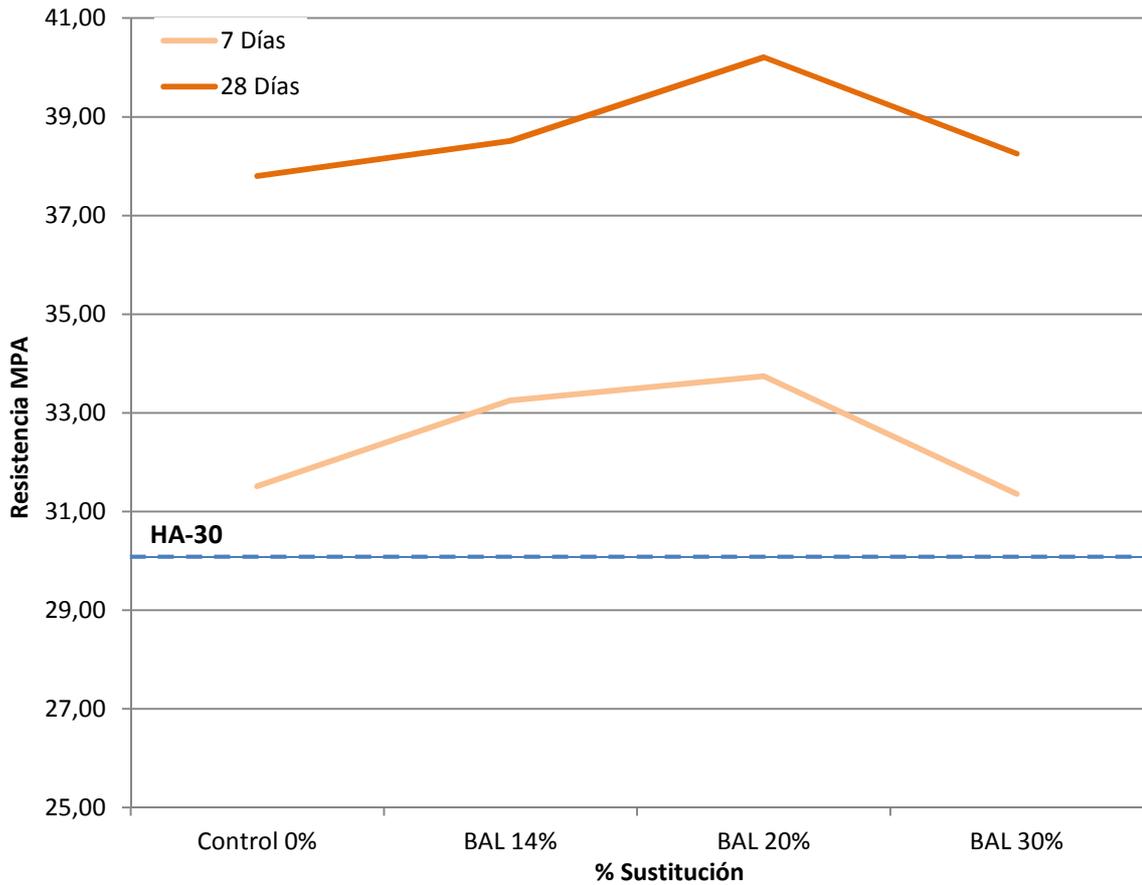


Gráfica 24. Consistencia, comparativa amasada control con sustituciones del 30%

8.4.2 Rotura a compresión de las probetas

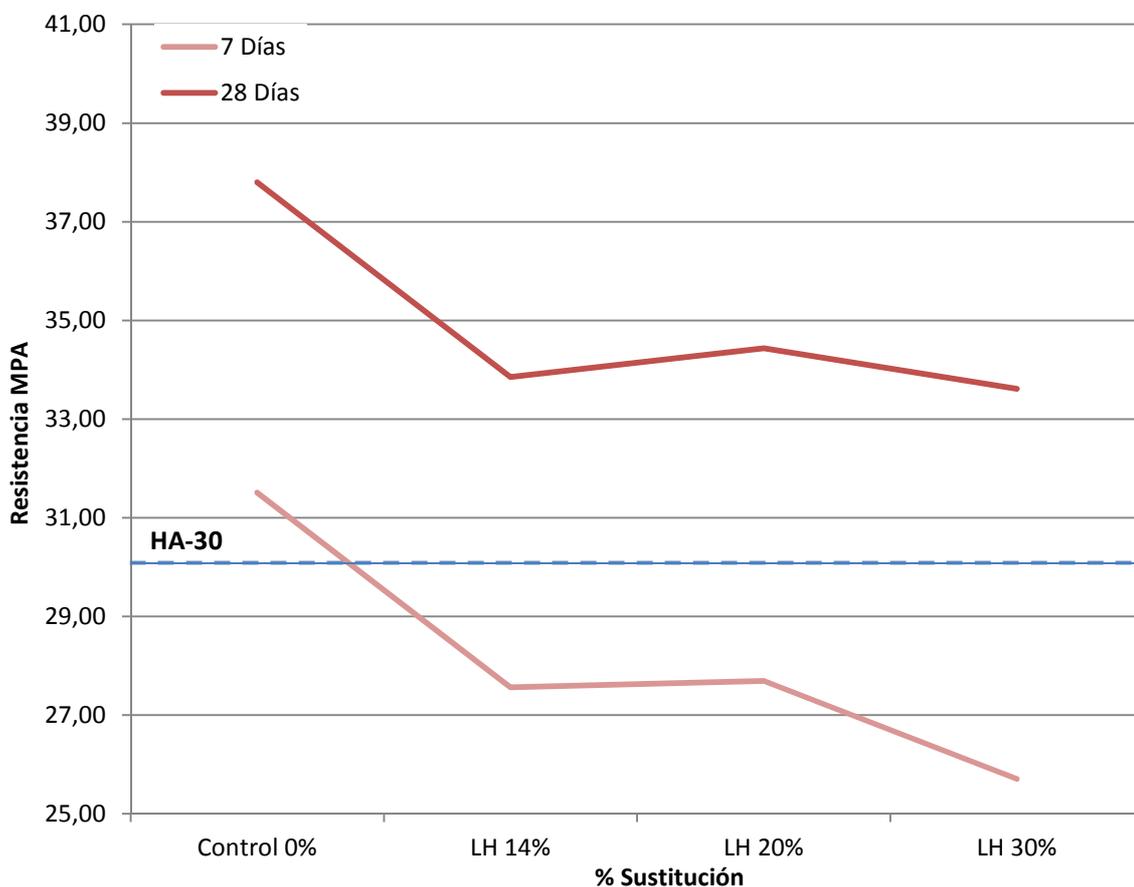
Se compara la resistencia media (MPa) obtenida en los ensayos de rotura de las probetas, se comparan los resultados obtenidos de tres formas distintas, el control con los tres porcentajes de sustitución del residuo utilizado, en las gráficas se representara un línea (HA-30) que es el mínimo de resistencia a 28 días que exige la EHE-08 para el hormigón utilizado en este estudio.

En la siguiente gráfica se expresa la resistencia a 7 días y a 28 días del amasado control y el residuo de baldosas en todas las sustituciones (14%, 20% y 30%), para observar la influencia de la sustitución de los residuos por árido reciclado en la evolución de la resistencia.



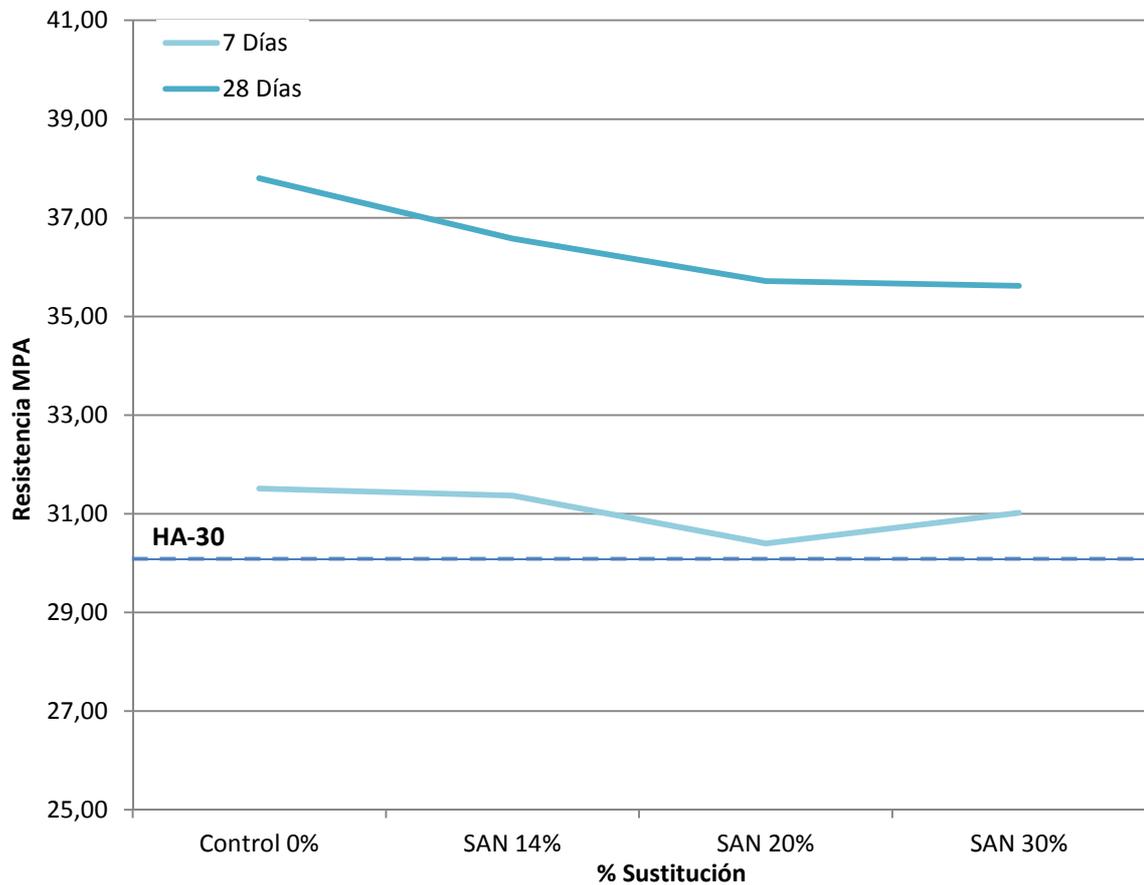
Gráfica 25. Resistencia a compresión, control y todas las amasadas de baldosas

En la siguiente gráfica se expresa la resistencia a 7 días y a 28 días del amasado control y el residuo de ladrillo en todas las sustituciones (14%, 20% y 30%), para observar la influencia de la sustitución de los residuos por árido reciclado en la evolución de la resistencia.



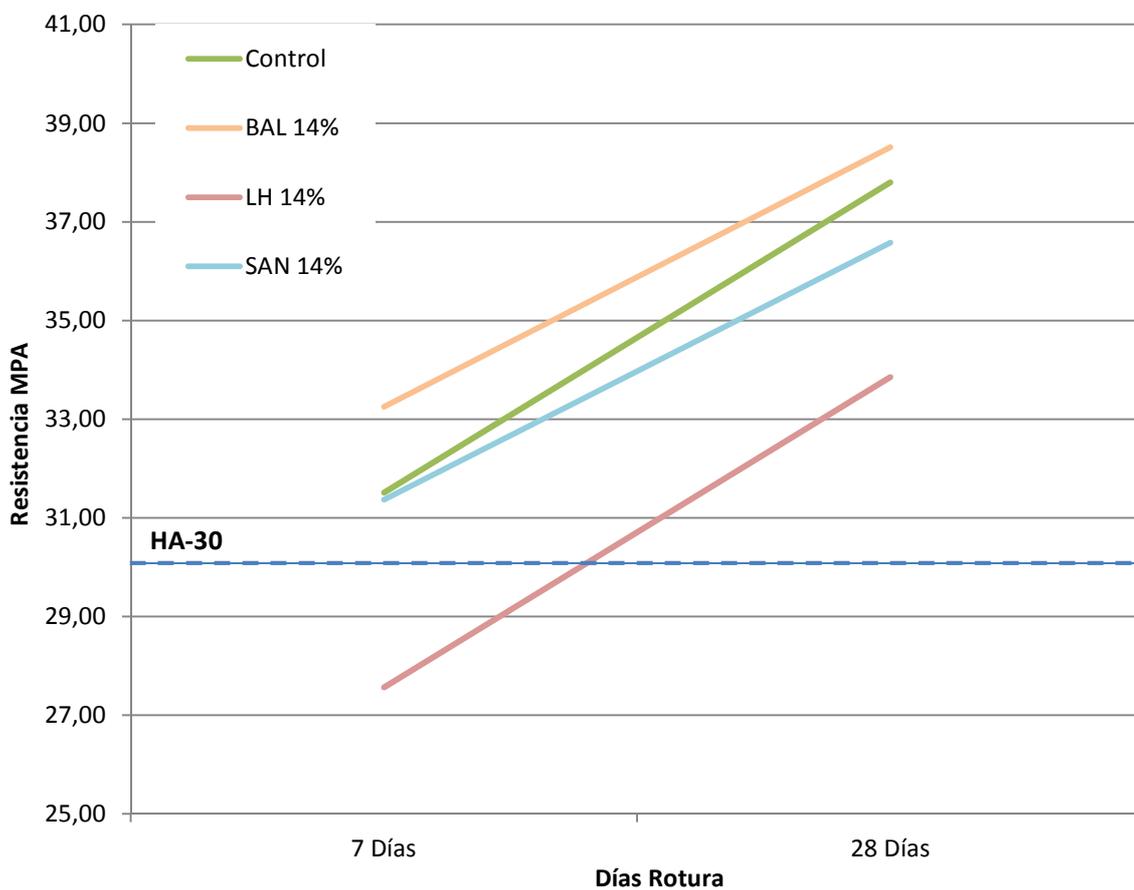
Gráfica 26. Resistencia a compresión, control y todas las amasadas de ladrillo

En la siguiente gráfica se expresa la resistencia a 7 días y a 28 días del amasado control y el residuo de cerámica sanitaria en todas las sustituciones (14%, 20% y 30%), para observar la influencia de la sustitución de los residuos por árido reciclado en la evolución de la resistencia.



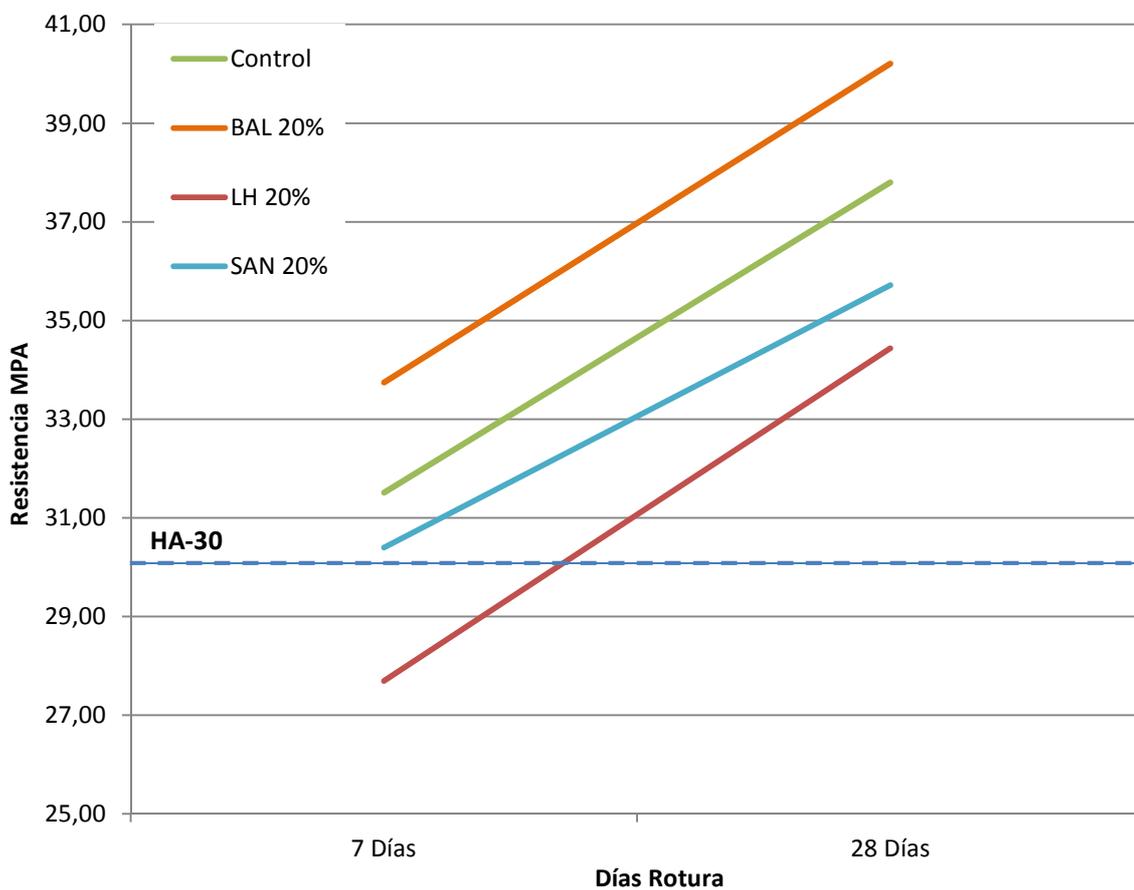
Gráfica 26. Resistencia a compresión, control y todas las amasadas de ladrillo

A continuación se compara la evolución de la resistencia entre la rotura a los 7 días y la rotura a los 28 días, entre el control y un porcentaje de sustitución del 14% de los tres residuos utilizados, baldosas, ladrillo y cerámica sanitaria.



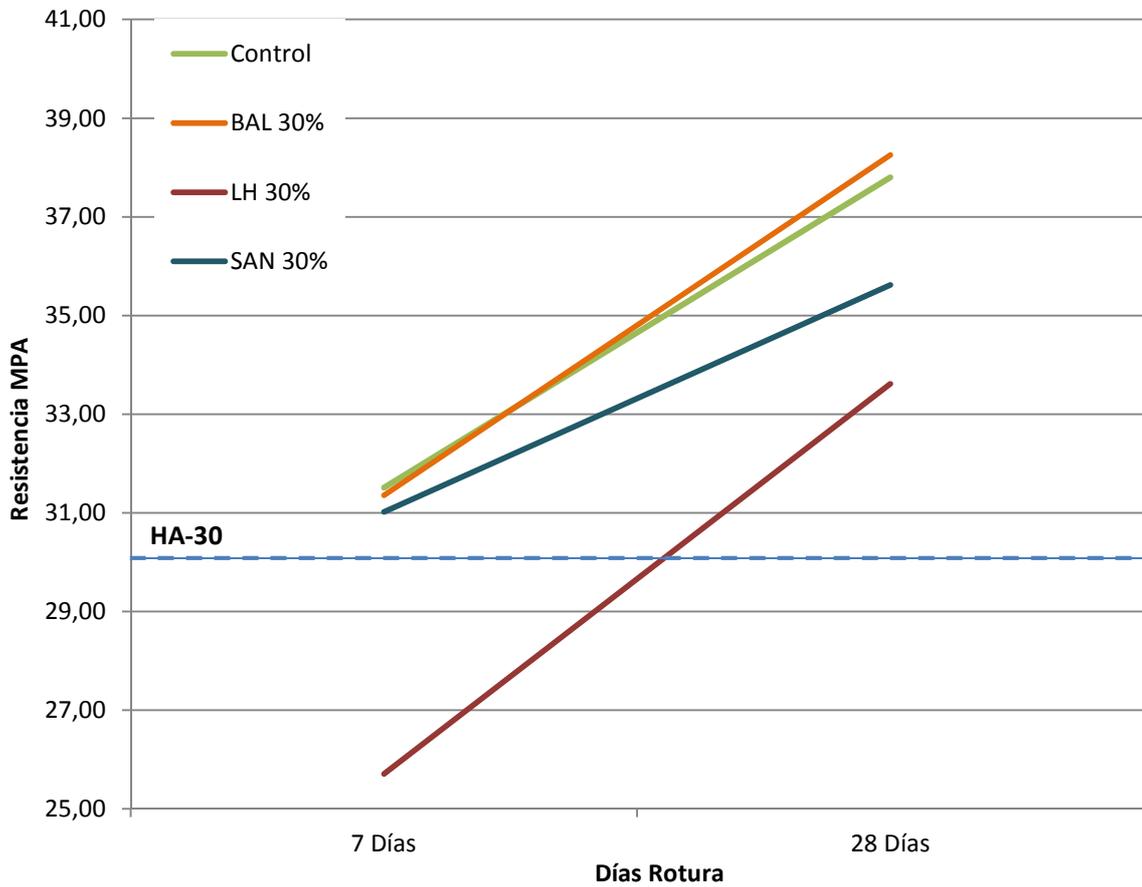
Gráfica 27. Evolución de la resistencia en el curado, sustituciones 14% y control

A continuación se compara la evolución de la resistencia entre la rotura a los 7 días y la rotura a los 28 días, entre el control y un porcentaje de sustitución del 20% de los tres residuos utilizados, baldosas, ladrillo y cerámica sanitaria.



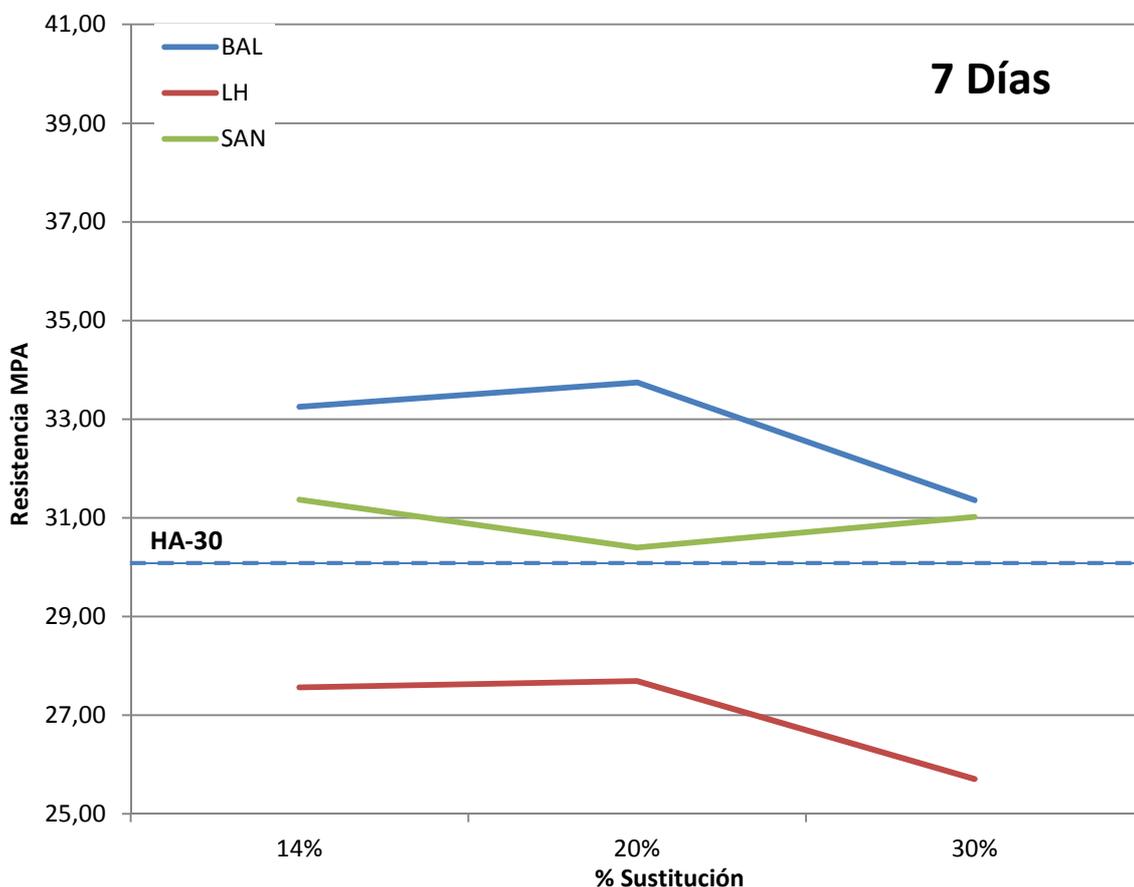
Gráfica 28. Evolución de la resistencia en el curado, sustituciones 20% y control

A continuación se compara la evolución de la resistencia entre la rotura a los 7 días y la rotura a los 28 días, entre el control y un porcentaje de sustitución del 30% de los tres residuos utilizados, baldosas, ladrillo y cerámica sanitaria.



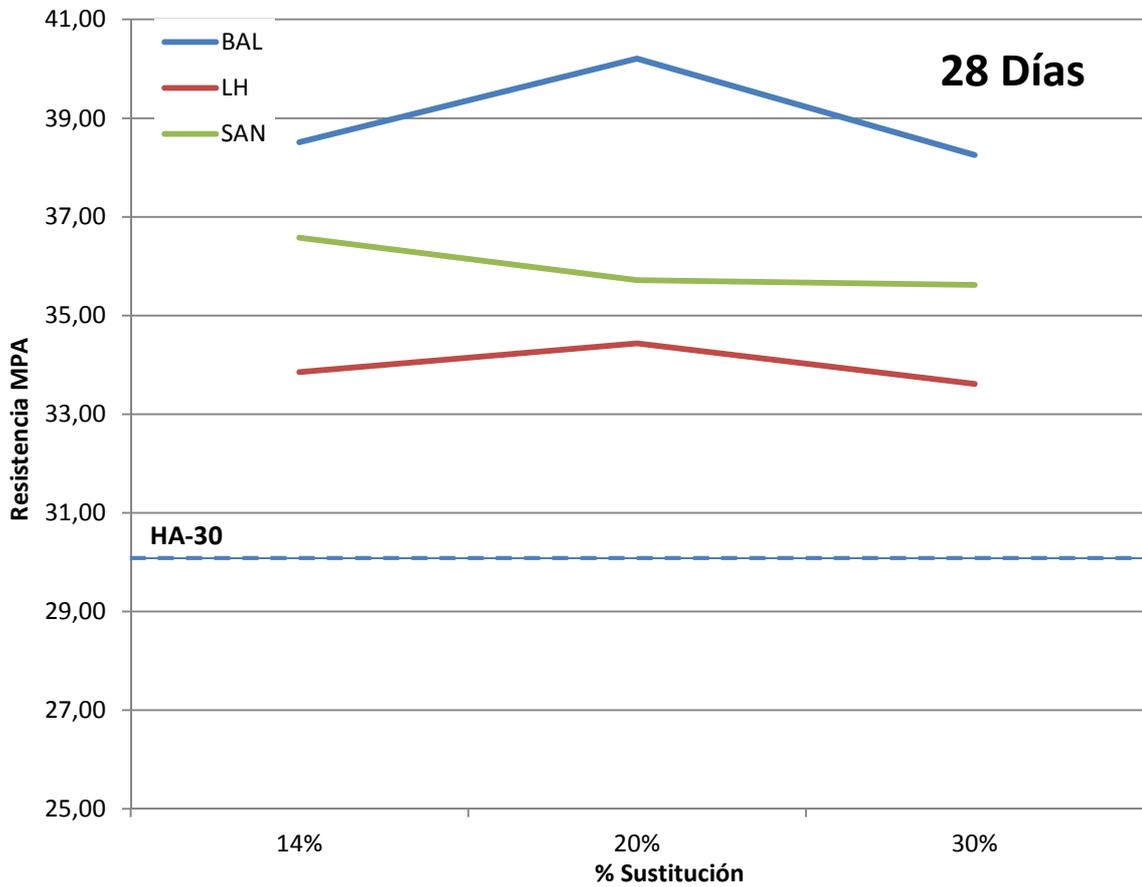
Gráfica 28. Evolución de la resistencia en el curado, sustituciones 30% y control

Comparativa de la influencia del porcentaje de sustitución (14%, 20% y 30%) de residuo por árido natural calizo, además de una comparativa entre los tres residuos utilizados, rotura a los 7 días de curado.



Gráfica 29. Evolución de la resistencia en el curado con 7 días de curado

Comparativa de la influencia del porcentaje de sustitución (14%, 20% y 30%) de residuo por árido natural calizo, además de una comparativa entre los tres residuos utilizados, rotura a los 28 días de curado.



Gráfica 30. Evolución de la resistencia en el curado con 28 días de curado

8.5 Conclusiones

La consistencia en las amasadas debido a una buena planificación se ha mantenido en todos los ensayos en consistencia plástica. No obstante, en las sustituciones del 30% de todos los residuos, la consistencia bajaba de 1 a 2 cm comparados con la amasada de control, manteniéndose siempre dentro de los parámetros de la consistencia plástica, es decir, cono entre 3 y 5 cm.

Los resultados del ensayo de resistencia a compresión se analizaran por separado cada residuo utilizado y después en su conjunto, debido a la importancia de estos datos en este estudio.

Las amasadas en la que se ha empleado el residuo de baldosas la resistencia es sensiblemente mejor a la de control, entre 1 y 2 KN en la rotura a 7 días y la de 28 días, siendo la más resistente BAL 20% con 2.5 KN más resistente que la amasada control, la amasada BAL 14% a los 7 días tiene una resistencia 2 KN mayor que BAL 30%, pero a los 28 días la resistencia es la misma. Las muestras en la que se ha empleado el residuo de ladrillo se registra, en las tres amasadas (LH 14%, LH 20%, LH 30%), una resistencia 4 KN por debajo de la amasada control en la rotura a 7 y 28 días, siendo ligeramente (menor a 1 KN) la más resistente LH 20%, éste es de los tres residuos utilizados el que ofrece menor dispersión en los resultados en los tres porcentajes de sustituciones. El residuo sanitario a los 7 días ofrece una resistencia casi igual que la amasada control, a excepción de SAN 20% que está 1 KN por debajo, a los 28 días y comparando con la amasada control, SAN 14% está 1 KN por debajo, SAN 20% está 2 KN por debajo y SAN 30% un poco más de 2 KN por debajo, el residuo sanitario pierde resistencia en comparación con la amasada control.

Se observa que entre la rotura de 7 y 28 días, la amasada control ofrece una mejora de 6.3 KN entre ambas roturas, el residuo de baldosas cuanto mayor es su porcentaje de sustitución, mayor es su evolución de resistencia en el curado de las probetas detectando un incremento de 5.3 KN en BAL 14% a 6.9 KN en BAL 30%. En el residuo de ladrillo este parámetro se mantiene más uniforme siendo el pico más alto en LH 20% con una evolución de 6.75 KN y el menor en LH 30% con 5.9 KN. En el residuo sanitario las amasadas SAN 14% y SAN 20% ofrecen mejoras muy parecidas entre 5.2 y 5.3 KN de mejora, y el pico más bajo SAN 30% solamente mejora 4.5 KN siendo este el que menos mejora de todas las amasadas.

“En tiempos de cambio, quienes estén abiertos al aprendizaje se adueñarán del futuro, mientras que aquellos que creen saberlo todo estarán bien equipados para un mundo que ya no existe.” (Eric Hoffer)

9. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos son el producto del procedimiento seguido a lo largo del presente estudio. En primer lugar, debe destacarse, que todas y cada una de las sustituciones de residuo por árido natural cumplen el ensayo de rotura a compresión del hormigón, siendo el hormigón control HA-30/P/20 y la resistencia menor de todos los ensayos es LH 30%, con una resistencia a compresión de 33.6 KN y un cono de Abrams de 4 cm. Por lo tanto todos los residuos con sus respectivos porcentajes de sustitución, son válidos para ejecutarlos como hormigón estructural.

En todas las amasadas se ha corregido la absorción de agua de todos los áridos que componían la amasada, para tener en todas las amasadas una relación agua/cemento efectiva de 0.55.

Los tres residuos utilizados en las diferentes sustituciones de porcentaje de residuos en las amasadas, indistintamente del cono de Abrams, ofrecían una trabajabilidad igual o mejor que el amasado control. En la sustitución de residuos del 14% y 20% el cono de Abrams se mantiene, pero en la sustitución del 30%, el cono de Abrams da un valor más bajo en los tres residuos (consistencia más seca).

El residuo de baldosas ofrece unas características físicas muy similares al árido natural, pero ofrece una mayor resistencia que éste, registrando el BAL 20% la resistencia más alta, de los ensayos realizados, con una resistencia de 40.2 KN, y un cono de 4 cm, 2.4 KN mayor que la amasada control y un 34% más que el mínimo a cumplir según normativa EHE-08.

Los residuos de ladrillo y sanitario, ambos tienen un coeficiente de forma muy alto (mayor número de partículas no cúbicas), más de tres veces superior al árido natural y el residuo de baldosas, por lo que sin un control exhaustivo es posible que el hormigón no se compacte bien y se produzcan coqueas, bajando así la resistencia a compresión del hormigón.

El coeficiente de absorción del residuo de cerámica sanitaria está dentro de los parámetros de la normativa, pero el residuo de baldosas con un 9% y el residuo de ladrillo con un 18% (máximo normativa 5%), a la hora de fabricar el hormigón reciclado, puede ser que sea más poroso que el hormigón convencional.

El coeficiente de fragmentación del ladrillo es casi del 50% de pérdida del material, según normativa no debe ser inferior al 30%, por lo tanto no sería recomendable utilizarlo en ambientes con un porcentaje elevado de erosión.

La normativa es escasa, para utilizar áridos reciclados en el hormigón estructural solo existe el anejo 15 de la EHE-08, y está no contempla la utilización de residuos cerámicos como es el caso de este estudio, sin embargo, queda demostrado en este estudio que si cumple la resistencia mínima exigida para un hormigón estructural.

De los tres residuos utilizados, es el residuo de baldosas cerámicas del que se obtienen mejores resultados y más homogéneos, en algunos ensayos incluso mejor que el árido natural calizo, con una rotura pico en la sustitución del 20% con 40.2KN de fuerza (10KN más del mínimo).

“Nunca me he encontrado con alguien tan ignorante de quien no pudiese aprender algo.” (Galileo Galilei)

10. Futuras líneas de trabajo

En el presente estudio se ha comprobado que sustituyendo áridos reciclados por árido natural, con algunos áridos incluso mejora su resistencia a la edad de 28 días, y su trabajabilidad apenas varía, aun así para llegar a utilizar este hormigón reciclado, se deberían de realizar otras comprobaciones como:

- Evolución de la resistencia a la edad de 180 y 365 días.
- Comprobar la sustitución ideal de residuos por árido natural.
- Investigar las mismas proporciones con otros residuos.
- Comprobar la resistencia con más porcentaje de sustitución.
- Ensayo de carbonatación.
- Ensayo de porosidad del hormigón reciclado.
- Ensayo penetración de agua.
- Recubrimiento mínimo del hormigón reciclado para proteger las armaduras.
- Durabilidad del hormigón reciclado en ambientes agresivos.
- Resistencia frente a la helada.

Sería muy interesante realizar ensayos de todo tipo con el residuo de mezcla de baldosas cerámicas, ya que se han obtenido unos datos muy buenos en este estudio, para en un futuro poder llegar a utilizar éste residuo en el hormigón estructural.

“El éxito es aprender a ir de fracaso en fracaso sin desesperarse.” (Winston Churchill)

11. BIBLIOGRAFÍA

- Aneiros, N. (2008). *Tecnología de las plantas de reciclaje de RCD y niveles tecnológicos en la UE*. Residuos 103, 56-64.
- Barbudo, M. (2012). *Aplicaciones de los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición en la construcción de infraestructuras viarias*. Córdoba: Universidad de Córdoba.
- Debueno, P. (2014). *Análisis de la gestión de residuos de construcción y propuesta de reciclaje de árido cerámico en la fabricación de hormigón*. Castellón: Universitat Jaume I.
- FERCD. (2015). *Informe de producción y gestión de los residuos de construcción y demolición en España, periodo 2009-2013*. Madrid.
- Fernández, M. (2007). *Hormigón*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Flor, G. (2012). *Aprovechamiento de hormigón reciclado en obras viales*. Buenos aires: Universidad Nacional de La Plata.
- Fornes de Gurrea, M. (1841). *Observaciones sobre la práctica del arte de edificar*. Valencia: Imprenta Cabrerizo.
- Galán, E; Aparicio, P. (2006). *Materias primas para la industria cerámica*. Universidad de Sevilla: 31-48.
- García Alcaraz, L. (2014). *Análisis económico-financiero del sector azulejero en España. Determinación de las empresas de éxito en el sector*. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- GEAR. (2012). *Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD)*. Madrid.
- Ger y Lobe, F. (1898). *Tratado de construcción civil*. Badajoz: La Minerva Extremeña.
- GERD. (2013). *Informe sobre gestión y control de la producción de los RCD en España periodo 2008 – 2011*. Madrid.
- Jiménez, P. (1991). *Hormigón armado*. Barcelona: Gustavo Gili.
- López, F. (2008). *Influencia en la variación de los parámetros de dosificación y fabricación del hormigón reciclado estructural sobre sus propiedades físicas y mecánicas*. Oviedo: Universidad de Oviedo.
- Ministerio de Medio Ambiente (2007). *Plan Nacional Integrado de Residuos, 2008-2015 (PNIR)*. Madrid.
- Ministerio de Medio Ambiente (2013). *Programa estatal de prevención de residuos*. Madrid.

Navarro, A. (2014). *Uso y fomento del árido reciclado en hormigón estructural como oportunidad de mejora medioambiental y económica. Aplicación a la Comunidad Autónoma de La Rioja*. Logroño: Universidad de La Rioja.

Pavón, E; Etxeberria, M; Martínez, I. (2011). *Propiedades del hormigón de árido reciclado fabricado con adiciones, activa e inerte*. Revista de la Construcción Volumen 10 N° 3, 4-15.

Pérez-Benedicto, J. A. (2012). *Características mecánicas de hormigones con áridos reciclados procedentes de los rechazos en prefabricación*. Materiales de Construcción Vol. 62, 305, 25-37.

Pilar Alaejos, P. (2006). *Recomendaciones para la utilización de árido reciclado en hormigón estructural*. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales (CEDEX), 1-12.

Pitarch, A; Reig, L. (2000). *Materiales de construcción II, Hormigones*. Castellón: Universitat Jaume I.

Pitarch, A; Reig, L. (2000). *Materiales de construcción II, Conglomerantes y conglomerados*. Castellón: Universitat Jaume I.

Residuos de construcción y demolición. (2010). Clave 4.1: 1-50.

Riestra, C. (2012). *Durabilidad del hormigón autocompactante*. Castellón: Universitat Jaume I.

Ruiz, E. (2010). *Estudio de viabilidad económica del negocio de reciclaje de residuos de construcción y demolición en la comunidad de Madrid y diseño planta de reciclaje*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.

Sánchez, M. (2004). *Aplicaciones de los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición en la construcción de infraestructuras viarias*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

Sánchez, M. (2011). *Ponencia I Mañana de la Edificación*. Madrid.

SEA. (2001). *Materias primas y métodos de producción de materiales cerámicos*. Baeza: Ponencias, XVI Reunión Científica de la Sociedad Española de Arcillas.

SGAPC. (2014). *Diagnóstico del Sector Residuos en España*. Número 7, abril 2014.

Thomas, C. (2011). *Hormigón reciclado de aplicación estructural: durabilidad en ambiente marino y comportamiento a fatiga*. Santander: Universidad de Cantabria.

Vidal, C. (2015). *Estudio Comparativo de los Sistemas de Gestión de RCD entre España y Brasil*. A Coruña: Universidad de la Coruña.

“El aprendizaje es experiencia, todo lo demás información.” (Albert Einstein)

AGRADECIMIENTOS

En Primer lugar, a Sheila Esteve, ya que fue la gran artífice, que me motivo intensamente a realizar este maravilloso camino, incluso antes de verse algún camino visible. Nunca olvidare todo tu apoyo, te estaré eternamente agradecido.

A mi familia, ya que sin su apoyo todo hubiera sido más difícil de conseguir.

A mis amigos, que me han aguantado mis charlas técnicas, alegrías y decepciones a lo largo de toda la carrera.

A mis tutores de proyecto Ángel y Lucía, me han asesorado y apoyado en todo momento, sin ellos este proyecto no sería posible.

A Ana Ester, técnico de laboratorio de la Universidad, que me ha facilitado todo el trabajo de este campo, y asesorado técnicamente a lo largo de todo el proyecto.

En general agradecer enormemente a todos los arriba citados, cada uno indistintamente ha puesto su granito de arena, para construir todo lo aquí conseguido, así que gracias.

“La obra que entrego al público contendrá, indudablemente, muchos lunares y errores que otras inteligencias más claras que la mía, o de superior ilustración, podrán subsanar con trabajos de mayor mérito. Creo, sin embargo, haber cumplido un deber social, exponiendo cuanto se y estimo de utilidad en la profesión a que he dedicado mis desvelos, sino con fortuna, al menos con buena voluntad.” (Florencio Ger y Lobe, 1898)