

MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE
HORMIGONES CON SUBSTITUCIÓN
TOTAL DE ÁRIDO GRUESO POR
SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES
(ESCORIA DE ACERÍA) Y RESIDUOS DE
CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN***

Estudiante
Director
Departamento
Curso académico

Lucas, Gutierrez, Iñigo
Orbe, Mateo, Aimar
Ingeniería Mecánica
2021-2022

Bilbao, 10 de septiembre de 2022

ÍNDICE

Resumen.....	1
Abstract	2
Laburpena.....	3
1. INTRODUCCIÓN.....	4
1.1 Producción del hormigón	4
1.2 Generación de residuos de construcción y demolición.....	5
1.3 Industria siderometalúrgica.....	6
1.4 Economía circular	7
2. OBJETO Y DIAGRAMA DE GANNT.....	9
3. MARCO TEÓRICO	11
3.1 Hormigón	11
3.1.1 Introducción	11
3.1.2 Componentes del hormigón	12
3.1.3 Tipos de hormigones	16
3.2 Residuos de construcción y demolición (RCD).....	18
3.2.1 Proceso de reciclaje de los RCD	18
3.2.2 Trabajabilidad.....	19
3.2.3 Porosidad	20
3.2.4 Características mecánicas.....	20
3.3 Escorias de Acería de Horno de Arco Eléctrico	21
3.4 Granulometría.....	23
3.4.1 Principio de Fuller.....	23
3.4.2 Principio de Bolomey.....	24
3.5 Tecnología del hormigón	25
3.5.1 Dosificación	25
3.5.2 Compactación.....	25
3.5.3 Fraguado y endurecimiento.....	26
3.5.4 Retracción	26
3.5.5 Curado.....	27
3.5.6 Características del hormigón.....	27
3.5.7 Problemas y patologías del hormigón	28
4. METODOLOGÍA	29

ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE HORMIGONES CON SUBSTITUCIÓN TOTAL DE ÁRIDO GRUESO POR SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES (ESCORIA DE ACERÍA) Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

4.1 Equipos empleados	29
4.2 Materias primas empleadas	31
4.2.1 Cemento.....	31
4.2.2 Agua	31
4.2.3 Árido natural	31
4.2.4 Escoria negra	32
4.2.5 Residuos de construcción y demolición (RCD)	32
4.2.6 Aditivos	33
4.3 Análisis granulométrico	34
4.3.1 Procedimiento	34
4.4 Dosificación y procedimiento de amasadas	41
4.4.1 Dosificación	41
4.4.2 Procedimiento de amasadas.....	45
4.4.3 Correcciones in situ	47
4.4.4 Nuevas dosificaciones.....	48
5. ENSAYOS Y RESULTADOS	49
5.1 Ensayos	49
5.1.1 Cono de Abrams	49
5.1.2 Determinación de la densidad y la porosidad.....	50
5.1.3 Ensayo de doble punzonamiento	51
5.2 Resultados.....	52
5.2.1 Consistencia del hormigón.....	52
5.2.2 Densidad y porosidad	53
5.2.3 Resistencia mecánica.....	56
6. CONCLUSIONES.....	61
7. REFERENCIAS	63

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1: Evolución de la producción del hormigón en España (en miles de m ³). Fuente: ANEFHOP.	4
Imagen 2: Evolución del consumo de cemento en España. Fuente: Oficemen [6].	5
Imagen 3: Residuos de Construcción y Demolición	5
Imagen 4: Producción de acero mundial, expresado en millones de toneladas.	6
Imagen 5: Acerías vascas en la Comunidad Autónoma Vasca.....	7
Imagen 6: Concepto de las 7R de reciclaje.	7
Imagen 7: Ciclo de la Economía Circular.	8
Imagen 8: Esquema de la composición del hormigón.	11
Imagen 9: Proceso de fabricación del Clinker.	14
Imagen 10: Pilares de hormigón armado.	16
Imagen 11: Armaduras pretesas.....	16
Imagen 12: Hormigón con fibras de acero.	17
Imagen 13: Hormigón proyectado.	17
Imagen 14: Clasificación del sector de la Construcción.	18
Imagen 15: Proceso de reciclaje de los Residuos de Construcción y Demolición.	19
Imagen 16: Las diferentes etapas durante el proceso de fabricación.	21
Imagen 17: Los cuatro tipos de residuos que genera el proceso de producción del acero (polvos de acería, cascarillas de laminación, arenas de fundición y escorias de acería).	22
Imagen 19: Representación de la curva granulométrica.	23
Imagen 18: Tamizado.	23
Imagen 20: Ecuación para obtener el porcentaje de peso que pasa por el tamiz.....	24
Imagen 21: Representación teórica de las curvas de Bolomey y Fuller.....	24
Imagen 22: Vibrado del hormigón.	25
Imagen 23: Fraguado del hormigón.....	26
Imagen 24: Retracción del hormigón.....	26
Imagen 25: Riego del hormigón para el curado.	27
Imagen 26: Evolución de la resistencia del hormigón con la edad.....	27
Imagen 27: Coqueras en un pilar de hormigón.	28
Imagen 29: Ficha técnica del CEM II/B-L facilitada por “Cementos Lemona” [29].....	31
Imagen 28: El cemento empleado para el ensayo.....	31
Imagen 30: Las diferentes muestras empleadas en el ensayo. De izquierda a derecha, arena caliza, arena de sílice y grava caliza.	32
Imagen 31: La escoria empleada durante el ensayo, tanto la arena como el árido grueso.....	32
Imagen 32: Proceso de derrumbamiento de la chimenea de la Central Térmica de Anllares. Fuente: Ana F. Barredo / EFE [31].....	33
Imagen 33: Muestra de los RCD.	33
Imagen 34: Las columnas de tamices empleadas en el ensayo.....	34
Imagen 35: Análisis granulométrico de la arena caliza.	36
Imagen 36: Análisis granulométrico de la grava caliza.	37
Imagen 37: Análisis granulométrico de los residuos de construcción y demolición.	38
Imagen 38: Análisis granulométrico de la escoria gruesa.	39
Imagen 39: Análisis granulométrico de la escoria fina.	40

ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE HORMIGONES CON SUBSTITUCIÓN TOTAL DE ÁRIDO GRUESO POR SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES (ESCORIA DE ACERÍA) Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

Imagen 40: Análisis granulométrico con 45% de arena y 55% de grava (caliza).	43
Imagen 41: Análisis granulométrico con 55% de arena (caliza) y 45% de grava (RCD).	43
Imagen 42: Análisis granulométrico con 60% de arena y 40% de grava (escoria).....	44
Imagen 43: Esquema del proceso de las amasadas.....	46
Imagen 44: Las bolas generadas durante el proceso de amasado con RCD.	47
Imagen 45: Probetas moldeadas y desmoldadas (referencia a la probeta Nº4 de escoria).	48
Imagen 46: Proceso de realización del Cono de Abrams.	49
Imagen 48: Pesaje de la probeta EAF6 e imagen del horno.....	50
Imagen 47: Probeta Nº5 de escoria.	50
Imagen 49: Ensayo de doble punzomaniento.	51
Imagen 50: Modelo de Bielas y Tirantes para el ensayo de doble punzonamiento o ensayo de Barcelona.....	51
Imagen 51: Representación del cono de Abrams realizado para cada amasada.	53
Imagen 52: Probetas desmoldadas.....	54
Imagen 53: Probetas tras realizar el ensayo de doble punzonamiento.....	56
Imagen 54: Recopilación de las probetas con los mejores resultados de cada amasada, junto al gráfico y la imagen de la misma.	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Diagrama de Gannt.	10
Tabla 2: Componentes del cemento [15].	12
Tabla 3: Composición de los cementos comunes utilizables en hormigón estructural. Fuente: Instrucción española RC-03 [17].	13
Tabla 4: Los principales efectos de cada tipo de adición.	13
Tabla 5: Clasificación de aditivos según el Código estructural [18].	15
Tabla 6: Datos relevantes de la toma de muestra de los RCD.	33
Tabla 7: Características del aditivo empleado en el ensayo.	33
Tabla 8: La suma del peso retenido en cada tamiz de los diferentes materiales.	34
Tabla 9: La suma del peso retenido en cada tamiz adaptado a las restricciones del Código Estructural.	35
Tabla 10: Datos calculados para determinar las dosificaciones.	42
Tabla 11: Las diferentes combinaciones posibles de dosificaciones.	42
Tabla 12: Dosificación original de referencia.	44
Tabla 13: Dosificación original con RCD.	44
Tabla 14: Dosificación original con escorias.	44
Tabla 15: Primera modificación de la dosificación con RCD, realizado durante el amasado.	47
Tabla 16: Segunda modificación de la dosificación con RCD, realizado durante el amasado.	47
Tabla 17: Dosificación final con RCD.	47
Tabla 18: Dosificación con RCD modificada tras introducir un nuevo material (arena de sílice).	48
Tabla 19: Dosificación con escorias modificada tras introducir un nuevo material (arena de sílice).	48
Tabla 20: Clases de consistencia según lo establecido por el Código Estructural [32].	50
Tabla 21: Fechas relevantes del ensayo.	52
Tabla 22: Consistencias obtenidas tras realizar el ensayo del Cono de Abrams.	52
Tabla 23: Datos sobre el pesaje de las probetas, y cálculos de densidad.	55
Tabla 24: Datos sobre la resistencia mecánica de las diferentes probetas, tanto a tracción como a compresión.	57

Resumen

En este proyecto se ha realizado un estudio de las propiedades que presentan los diferentes tipos de amasadas de hormigón con dosificaciones similares. Exactamente se han analizado tres tipos de hormigones: Un hormigón de referencia en base a un hormigón convencional con árido calizo, un hormigón con áridos de origen de Residuos de Construcción y Demolición y un hormigón con Escorias de Acería procedentes de Horno de Arco Eléctrico.

En primer lugar, ha sido necesario realizar un análisis granulométrico de los diferentes materiales empleados, y posteriormente se ha procedido a calcular las dosificaciones correspondientes para cada amasada. Las materias primas como el agua o el cemento han sido cantidades “fijas” para las tres amasadas, por lo que la variación se ha realizado en las cantidades de los áridos finos y gruesos.

Para ello ha sido necesario realizar un estudio previo sobre el hormigón convencional, analizando sus propiedades. Además, se han recopilado datos de estudios realizados sobre hormigones con áridos de RCD y de Escorias, comparándolo con los ensayos realizados.

A pesar de que el objetivo principal del estudio es analizar las propiedades mecánicas de los diferentes hormigones, también se ha procedido a determinar la densidad y porosidad, puesto que son características fundamentales para la trabajabilidad y durabilidad de los materiales.

Con este ensayo se pretende dar salida a productos que en primera instancia están destinados a vertederos, impulsando la economía circular y fomentando investigaciones en base al reciclaje de materiales.

Palabras clave: Hormigón Convencional, Residuos de Construcción y Demolición (RCD), Escorias de Acería de Horno de Arco Eléctrico, Características mecánicas.

Abstract

In this project, a study of the properties presented by the different types of mixtures with similar dosages has been carried out. Exactly, three types of concrete have been analyzed: A reference concrete based on conventional concrete, a concrete with aggregates from Construction and Demolition Waste and a concrete with Steel Slag from an Electric Arc Furnace.

In the first place, it has been necessary to carry out a granulometric analysis of the different materials used, and subsequently the corresponding dosages for each batch have been calculated. The raw materials such as water or cement have been “fixed” amounts for the three batches, so the variation has been made in the amounts of fine and coarse aggregates.

For this, it has been necessary to carry out a previous study on conventional concrete, analyzing its properties. In addition, data from studies carried out on concrete with CDW and slag aggregates have been compiled, comparing it with tests carried out.

Although the main objective of the study is to analyze the mechanical properties of the different concretes, the density and porosity have also been determined, since they are fundamental characteristics for the workability and durability of the materials.

This essay is intended to release products that are initially destined for landfills, promoting the circular economy and research based on the recycling of materials.

Keywords: Conventional concrete, Construction and Demolition Waste (CDW), Electric Arc Furnace Steel Slag, Mechanical Characteristics.

Laburpena

Proiektu honetan, antzeko proportzioak dituzten hormigoi mota ezberdinek aurkezten dituzten propietateen azterketa egin da. Zehazki hiru hormigoi mota aztertu dira: Ohiko hormigoian oinarritutako erreferentziako hormigoia, Eraikuntza eta Eraispén Hondakinetak (EEH) agregakinak dituen hormigoia eta Arku Elektrikoko Labeko Altzairuzko Zepadun hormigoia.

Lehenik eta behin, erabilitako materialen analisi granulometrika egin da, eta ondoren, lote bakoitzari dagozkion dosifikazioa definitu da. Ura edo zementua bezalako lehengaiei dagokienez hiru loteen edukia "finkoa" izan da, beraz, dosifikazioaren aldakuntza agregatu fin eta lodien kantitateetan egin da.

Horretarako beharrezkoa izan da ohiko hormigoia buruzko azterketa bat egitea, bere propietateak aztertu ahal izateko. Horrez gain, hormigoian EEH eta zepa agregakinekin egindako azterketen datuak bildu dira, egindako probarekin alderatuz.

Ikerketaren helburu nagusia hormigoi ezberdinen propietate mekanikoak aztertzea bada ere, dentsitatea eta porositatea ere zehaztu dira, materialen langarritasuna eta iraunkortasunareko oinarritzko ezaugarriak baitira.

Idazlan honek, zabortegetara bideratzen diren produktuei beste irteera emateko aukera planteatzen da, ekonomia zirkularra eta materialen birziklapenean oinarritutako ikerketa sustatuz.

Hitz-gakoak: Ohiko hormigoia, Eraikuntza eta Eraispéneko Hondakinak (EEH), Arku Elektrikoko Labeko Altzairuzko Zepa, Ezaugarri Mekanikoa.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Producción del hormigón

El sector de la construcción es responsable de producir anualmente aproximadamente 6 mil millones de toneladas de CO₂, equivalente al 23% de las emisiones mundiales de CO₂. Entre los más destacados, se presentan China, con un 40% del total, EU-27 y EE. UU., con un 18% y 13% respectivamente [1]. Según la Asociación Mundial del Cemento y el Hormigón (GCCA), en el año 2020 se generaron un total de 14 mil millones de metros cúbicos de hormigón, produciendo 4.200 millones de toneladas de cemento [2]. Además, la demanda de materia prima como árido es de aproximadamente 3.000 millones de toneladas en los países pertenecientes a la Unión Europea y de 900 millones de toneladas en EE. UU. [3].

Según redacta el informe anual 2021 de La Asociación Nacional Española de Fabricantes de Hormigón Preparado (ANEFHOP), la producción de hormigón logró cierta recuperación tras la pandemia, experimentando un aumento del 13,1% respecto al año anterior, y con una producción de 25,8 millones de metros cúbicos [4].

En la *Imagen 1*. se puede apreciar la producción del hormigón durante los últimos 15 años:



Imagen 1: Evolución de la producción del hormigón en España (en miles de m³). Fuente: ANEFHOP.

El cemento es el producto que más destaca en el hormigón, puesto que la industria cementera contribuye directamente a las emisiones de CO₂, produciendo un 5% del total, con un balance de 900 kg de CO₂ por cada 1000 kg de cemento producido. Según datos de Oficemen (Agrupación de fabricantes de cemento de España), entre febrero de 2021 y enero de 2022 hubo un crecimiento en la producción del cemento del 14,1%, con un total de 15 millones de toneladas, en lo que se traduce en 13,6 millones de toneladas de CO₂ [5].

En la *Imagen 2* se puede apreciar la evolución del consumo de cemento en España, expresado en miles de toneladas:

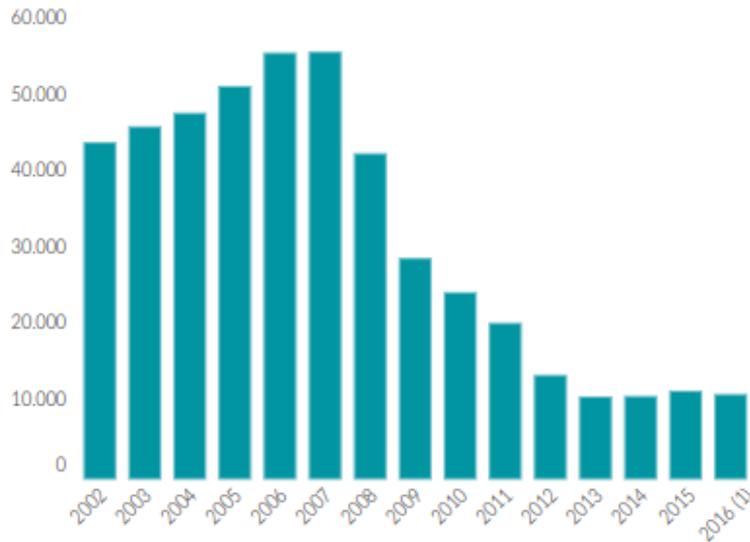


Imagen 2: Evolución del consumo de cemento en España. Fuente: Oficemen [6].

1.2 Generación de residuos de construcción y demolición

La construcción de nuevos edificios y la demolición y mantenimiento de edificios existentes generan un desperdicio de materiales. Entre estos residuos de construcción y demolición (también conocido como RCD), se encuentran materiales como el hormigón, tejas, materiales cerámicos, plástico, madera, metales o vidrio [7].

Los RCD representan una gran parte de los residuos generados en la Tierra. Por ejemplo en EE. UU., en 1980 se contabilizaron un total de 50 millones de toneladas de RCD, frente a los más de 548 millones de toneladas en 2015, generando 10 veces más residuos en tan sólo 40 años. Sin embargo, China se presenta como el país que más residuos de este tipo genera, con un total de 1.500 millones de toneladas, frente a los 850 millones de toneladas de la Unión Europea [7].



Imagen 3: Residuos de Construcción y Demolición

La eliminación inadecuada de los RCD supone un gran problema al que se enfrentan muchos países, debido a que se han producido vertidos a cielo abierto, provocando una gran contaminación ambiental, inundaciones, impacto ambiental y proliferación de enfermedades.

Ante esta situación se impulsa la alternativa de reciclaje y reutilización de estos residuos. Por ejemplo, en Europa y EE. UU., el 30% del volumen total de los RCD se destina al reciclaje. Además, este proceso puede generar un subproducto conocido como agregado reciclado, considerado como una solución ecológica debido a la escasez de recursos naturales y necesidad de vertederos [7].

1.3 Industria siderometalúrgica

La industria siderometalúrgica es la encargada de extraer o tratar el mineral de hierro, obteniendo aleaciones como el acero. Se trata de una de las industrias más importantes a nivel mundial, produciendo un total de 1.900 millones de toneladas en 2021, con un aumento del 5,3% respecto al año anterior.

China se presenta como el mayor productor de metal, que durante el año 2021 sufrió un descenso en la producción del 3%. Sin embargo, India y Japón, que se encuentran en segundo y tercer lugar, tuvieron un aumento del 17,8% y 15,8%, respectivamente [8].

Aunque la pandemia ha influido en la producción del acero en muchos países, en España se produjo un total de 14 millones de toneladas, y que según los datos hechos públicos por la World Steel Association, la principal organización mundial de acero, la producción en 2017 se situó en 14,5 millones de toneladas. Por lo tanto, se puede concluir que la producción siderúrgica ha recuperado los valores previos a la pandemia [9].

En el *Gráfico 1.*, se puede observar como anualmente aumenta la producción de acero mundial, aunque se produjera un ligero descenso en el año 2009 debido a la crisis.



Imagen 4: Producción de acero mundial, expresado en millones de toneladas.

La industria siderometalúrgica ha sido una de las actividades económicas más importantes del País Vasco, especialmente en Vizcaya y Guipúzcoa. El desarrollo de la industria tuvo lugar debido a los siguientes factores:

- Depósitos de mineral de hierro.
- Hidrografía, que proporciona una fuente de energía disponible para la alimentación de los hornos.
- Bosques extensos, de los cuales se obtenía carbón para alimentar los hornos.

Durante gran parte del siglo XX, Altos Hornos de Vizcaya fue considerada la mayor empresa de España tras la fusión de varias empresas siderometalúrgicas de Vizcaya. Esta empresa tuvo la capacidad de producir dos millones de toneladas de acero, además de transformar 3 millones de toneladas [10].

ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE HORMIGONES CON SUBSTITUCIÓN TOTAL DE ÁRIDO GRUESO POR SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES (ESCORIA DE ACERÍA) Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

A día de hoy, pese al descenso en la producción, Euskadi se sigue manteniendo como la gran potencia de España en este sector, generando el 20% del acero de horno eléctrico. Se trata de una industria transformadora, cuya producción se basa en productos largos, de acero inoxidable y acero especial, que suministra a sectores como la construcción, la automoción o electrodomésticos.

En la *Imagen 4.*, se pueden apreciar las plantas del sector siderúrgico en Euskadi.



Imagen 5: Acerías vascas en la Comunidad Autónoma Vasca.

1.4 Economía circular

Se trata de un modelo de producción y consumo que implica compartir, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales con el objetivo de extender el ciclo de la vida de los productos, manteniendo su utilidad o valor y evitando posibles residuos.

La economía circular contrasta con el modelo económico lineal tradicional, basado en el concepto de “usar y tirar”, un modelo que implica un alto coste medioambiental y que requiere de grandes cantidades de materiales y energía. Como bien es sabido, la mayoría de materias primas son finitas, que tras el aumento de la población, y por consiguiente la demanda, es necesario avanzar hacia una economía circular. También es preciso destacar la dependencia de ciertos países respecto a otros, o el impacto ambiental que se genera tras la extracción y consumo de ciertas materias primas que producen grandes emisiones de dióxido de carbono (CO₂) [11].

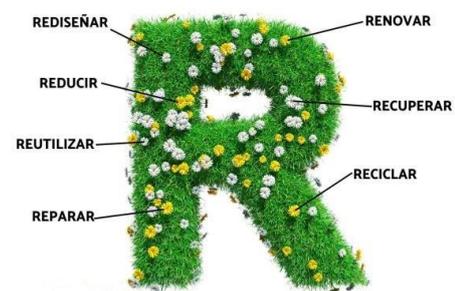


Imagen 6: Concepto de las 7R de reciclaje.

La economía circular se basa en los siguientes principios [12]:

- Basura = Alimento: Desaparece el concepto de residuo, reutilizando los diferentes productos.

ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE HORMIGONES CON SUBSTITUCIÓN TOTAL DE ÁRIDO GRUESO POR SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES (ESCORIA DE ACERÍA) Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

- Diversificación: Se trata de obtener un sistema resistente y resiliente, capaz de mantener la estructura y el funcionamiento tras una perturbación.
- Nuevo modelo de propiedad: El producto iría mejorando cada cierto tiempo empleando los componentes de aparatos obsoletos (reutilizar-reparar).
- Energía de fuentes renovables: La economía circular apuesta por el empleo de energías renovables en detrimento de los combustibles fósiles y nucleares.
- Precios prácticos: Los precios se deben ajustar al coste real del producto para secundar el consumo racional (reducir).



Imagen 7: Ciclo de la Economía Circular.

La Comisión Europea presentó en marzo de 2020 el “Plan de Acción para la Economía Circular”, que tiene como objeto conseguir productos más sostenibles y reducir los residuos. Para llevarlo a cabo, se proponen ciertas medidas, destacando los sectores que emplean más recursos y que tienen un elevado potencial de circularidad (construcción y vivienda) [13].

Aplicando la economía circular al sector de la construcción, se pueden tomar ciertas medidas, reutilizando materiales ya empleados mediante un proceso de separación, destacando los siguientes:

- Acero: Se trata de un componente capaz de volver a utilizar sin llegar a perder sus propiedades.
- Madera: Tras un tratamiento y cuidado de los residuos de madera, se puede emplear en otras construcciones, y para casos en los que no sea factible, se puede destinar a la creación de la biomasa.
- RCD: Tras una separación adecuada de los diferentes componentes, se puede volver a reutilizar en construcciones nuevas, limitando la cantidad.
- Árido siderúrgico: Se puede reutilizar empleándolo en numerosas creaciones como baldosas, adoquines, asfaltos u obras marítimas.

2. OBJETO Y DIAGRAMA DE GANNT

El principal objetivo del presente estudio es analizar y comparar el comportamiento del hormigón empleando diferentes materias primas. Para ello, se establecerá una dosificación general, procediendo a la realización de las amasadas con áridos naturales (en representación del hormigón convencional), áridos reciclados y áridos siderúrgicos.

Con esto se pretende analizar la opción de emplear hormigones más sostenibles, valorizando los residuos generados en demoliciones o acerías y obteniendo subproductos adecuados.

Para ello, será necesario realizar un análisis previo sobre la granulometría de los diferentes materiales, que posteriormente, se empleará para la definición de las dosificaciones obteniendo las opciones óptimas.

Asimismo, se pretende impulsar el empleo de materiales más sostenibles en detrimento de los materiales convencionales, favoreciendo la economía circular.

Para lograr el objetivo del Trabajo de Fin de Máster, se ha llevado a cabo una planificación, en el cuál se han definido la cronología y las diferentes fases del proyecto a través del diagrama de Gannt:

ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE HORMIGONES CON SUBSTITUCIÓN TOTAL DE ÁRIDO GRUESO POR SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES (ESCORIA DE ACERÍA) Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

ACTIVIDAD	MES	MAYO				JUNIO				JULIO				AGOSTO				SEPTIEMBRE	
	SEMANA	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
<i>Definición del proyecto</i>		■	■																
<i>Recopilación de información</i>				■	■	■													
<i>Análisis granulométrico</i>						■													
<i>Cálculo de dosificaciones</i>							■												
<i>Realización de amasadas</i>								■											
<i>Obtención de resultados</i>												■							
<i>Redacción de la memoria</i>						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Tabla 1: Diagrama de Gannt.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Hormigón

3.1.1 Introducción

El hormigón es un material de construcción compuesto esencialmente por un material aglomerante, al que se le añade agua, aditivos y áridos, tanto finos como gruesos.



Imagen 8: Esquema de la composición del hormigón.

Generalmente, para la realización del hormigón se suele emplear cemento. El cemento de por sí no es un material aglomerante, pero al mezclarlo con agua se produce una reacción química de hidratación, formando una pasta de cemento y que en el transcurso de unas horas, derivan en el fraguado y endurecimiento de la mezcla.

Se trata del material más empleado en la construcción debido a su capacidad de resistir esfuerzos a compresión, sin embargo, las resistencias a tracción y esfuerzo cortante son bajas, por lo que se refuerzan mediante el empleo de barras de acero, también conocido como hormigón armado.

A la hora de proyectar un elemento de hormigón, es necesario establecer qué tipo de hormigón se va a emplear. Según el Código Estructural, los hormigones están tipificados de la siguiente manera, siendo de obligado cumplimiento referirse de esta forma en los planos y demás documentos del proyecto [14].

T - R / C / TM / A

T: se denominará HM (hormigón en masa), HA (hormigón armado) y HP (hormigón pretensado).

R: resistencia característica del hormigón expresada en N/mm^2 .

C: letra inicial del tipo de consistencia: Seca, Plástica, Blanda, Fluida y Líquida.

TM: tamaño máximo del árido (en milímetros).

A: designación del ambiente a que estará expuesto el hormigón.

3.1.2 Componentes del hormigón

3.1.2.1 Cemento

El cemento es un material aglomerante, es decir, es un material capaz de unir fragmentos de otras sustancias y dar cohesión al conjunto mediante reacciones químicas, por lo tanto, son utilizados como medio de unión. Es un producto artificial, obtenido de materias primas naturales y subproductos industriales, que finalmente son molidos hasta obtener el producto final.

Las materias primas empleadas en la fabricación del cemento deberían tener los siguientes componentes:

Nombre común	Fórmula	% habitual en crudo
Cal	CaO	40-45
Sílice	SiO ₂	10-15
Alúmina	Al ₂ O ₃	3-4,5
Hierro	Fe ₂ O ₃	1,5-2,5

Tabla 2: Componentes del cemento [15].

Ya que es difícil encontrar una materia prima única que sea capaz de aportar estos componentes en estas mismas proporciones, es necesario mezclar varias materias hasta alcanzar la composición requerida. Los materiales más empleados son los calcáreos (calizas o margas) y los silicioaluminosos (arcillas). Debido a que estos materiales se obtienen mediante voladuras, es necesario realizar un proceso de trituración y molienda hasta obtener una gran finura [15].

La composición del cemento se basa en las siguientes adiciones [16]:

- Escoria de Alto Horno (S): Se obtienen por el enfriado brusco de la ganga fundida del proceso siderúrgico.
- Humo de Sílice (D): Son partículas muy finas que contienen sílice reactivo.
- Puzolanas naturales (P): Por lo general suelen ser de origen volcánico y no presentan propiedades hidráulicas.
- Puzolana natural calcinada (Q): Son materiales de origen volcánico, arcillas, pizarras o rocas sedimentarias activadas por tratamiento térmico.
- Cenizas Volantes Silíceas (V): Es un subproducto obtenido de los gases de combustión de carbones pulverizados.
- Cenizas Volantes Calcáreas (W): Se trata de un polvo fino que contiene propiedades hidráulicas o puzolánicas.
- Esquistos calcinados (T): Se produce en un horno especial a altas temperaturas y que finamente molido presenta buenas propiedades hidráulicas.
- Caliza (L/LL): Se trata de carbonato cálcico en forma de calcita.

Cabe destacar que el Clinker se emplea en cualquier tipo de cemento, y se obtiene por calcinación hasta la fusión parcial de las mezclas de calizas y arcillas, por lo tanto, se trata del elemento base del cualquier cemento.

A continuación se puede apreciar el tipo de cemento que se puede obtener en función de la composición de las adiciones según la norma UNE EN 197-1:2011.

ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE HORMIGONES CON SUBSTITUCIÓN TOTAL DE ÁRIDO GRUESO POR SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES (ESCORIA DE ACERÍA) Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

Tipos	Denominación	Designación	Composición (proporción en masa ^{1) 5)}										Componentes. minoritarios	
			Componentes principales											
			Clinker K	Escoria de horno alto S	Humo de sílice D ²⁾	Puzolana		Cenizas volantes		Esquistos calcinados T	Caliza ⁴⁾			
Natural P	Natural calcinada Q	Silíceas V				calcáreas W	L	LL						
CEM I	Cemento pórtland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Cemento pórtland con escoria	CEM I/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM I/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento pórtland con humo de sílice	CEM I/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento pórtland con puzolana	CEM I/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM I/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM I/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM I/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento pórtland con ceniza volante	CEM I/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM I/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM I/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
	Cemento pórtland con esquistos calcinados	CEM I/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
		CEM I/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
	Cemento pórtland con caliza	CEM I/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
		CEM I/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
	Cemento pórtland con caliza	CEM I/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
		CEM I/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
CEM I/B-LL		65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5	
Cemento pórtland compuesto ³⁾		CEM I/A-M	80-88	12-20									0-5	
	CEM I/B-M	65-79	<----- 21-35 ----->									0-5		
CEM III	Cemento de horno alto	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Cemento puzolánico ³⁾	CEM IV/A	65-89	-	<----- 11-35 ----->						-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	<----- 36-55 ----->						-	-	0-5	
CEM V	Cemento compuesto ³⁾	CEM V/A	40-64	18-30	-	<----- 18-30 ----->			-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-49	-	<----- 31-49 ----->			-	-	-	-	0-5	

Tabla 3: Composición de los cementos comunes utilizables en hormigón estructural. Fuente: Instrucción española RC-03 [17].

Sin embargo, cada tipo de adición puede llegar a tener unos efectos añadidos:

TIPO DE ADICIÓN	PRINCIPALES EFECTOS
Escoria granulada de alto horno (S)	Disminuye la reactividad a corto plazo. Disminuyen las retracciones. Ganancia de resistencia más lenta.
Puzolana natural (P)	Disminuye la reactividad a corto plazo.
Puzolana calcinada (Q)	Disminuye la reactividad a corto plazo.
Ceniza volante silíceas (V)	Aporta una resistencia a largo plazo y mejora la durabilidad y trabajabilidad.
Ceniza volante calcárea (W)	Mejora la trabajabilidad.
Esquisto calcinado (T)	Disminuye la reactividad a corto plazo.
Filleres calizos (L y LL)	Completa los huecos de la granulometría de los finos del árido.

Tabla 4: Los principales efectos de cada tipo de adición.

Debido a que cada adición genera unos efectos añadidos, es necesario mezclarlo con Clinker (para mitigar los efectos que puedan darse), y por lo tanto, tener de base esta misma adición. A continuación se menciona el proceso de fabricación del Clinker.

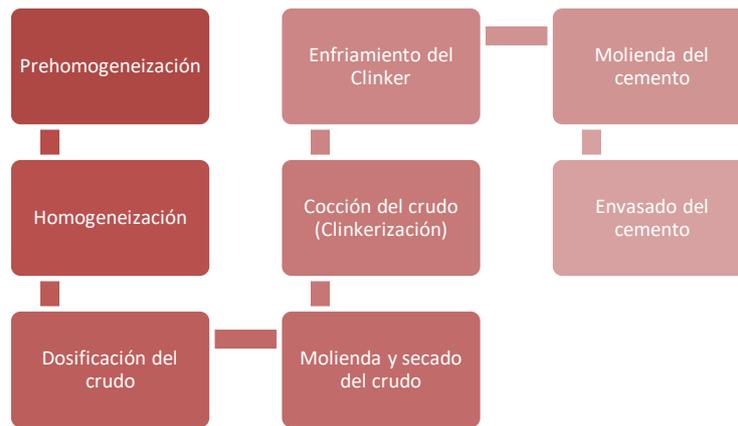


Imagen 9: Proceso de fabricación del Clinker.

Finalmente los cementos se tipifican de la siguiente manera:

CEM II/A-P/42,5 UNE 80.301

CEM II: Cemento portland con adiciones

A-C: Adición tipo puzolana

42,5: Resistencia a compresión de 42,5MPa

UNE 80.301: Norma UNE que cumple

3.1.2.2 Áridos

Los áridos son materiales de uso inorgánico, bien de origen natural, como rocas sedimentarias y silicatos, de origen artificial, como áridos siderúrgicos, o bien reciclados, como los áridos de residuos de construcción y demolición (RCD).

Los áridos pueden ser rodados o machacados. El primer caso, se caracteriza por tener mayor trabajabilidad debido a la forma redondeada, en cambio, los segundos presentan formas angulosas por lo que su trabajabilidad es menor. Por lo general, los áridos machacados resultan tener mayor resistencia a compresión, debido a que le confieren al hormigón endurecido una mayor trabazón. Además de esto, los áridos se clasifican en función de la fracción obtenida entre la división del árido mínimo y el máximo (árido d/D):

- Arena: Se denomina arena a la fracción menor de 4 mm, y resulta ser el árido de mayor responsabilidad, por lo que es necesario que la calidad de la arena sea adecuada. La humedad de la arena tiene gran relevancia en la dosificación del hormigón, por lo que resulta de gran importancia tener en consideración este aspecto.
- Grava: Se denomina grava a la fracción mayor de 4 mm. La resistencia de la grava viene definida por su dureza, densidad y módulo de elasticidad, sin olvidar su coeficiente de forma. Para la fabricación del hormigón se evitará el empleo de áridos con formas redondeadas, alargadas o laminares, ya que no aportan la resistencia requerida y necesitan mayor cantidad de cemento.

Cabe mencionar que los áridos deben tener una gran resistencia a las heladas, así como al desgaste de la grava para evitar la degradación del hormigón.

3.1.2.3 Agua

Para que se puedan dar las reacciones de hidratación del cemento es necesario emplear la cantidad de agua de amasado adecuada. Un exceso conllevaría problemas de resistencia, ya que al evaporarse ese exceso de agua se generarían unos huecos (poros) en el hormigón. Sin embargo, una cantidad mínima de agua podría llegar a ser contraproducente, ya que reduciría la trabajabilidad y compactación de éste.

Además del agua de amasado es fundamental añadir agua de curado, durante el proceso de curado y primer endurecimiento del hormigón, ya que así, se obvia la desecación y se evita la retracción prematura del hormigón.

Es importante tener en cuenta las condiciones del agua, por lo general, la viabilidad del agua la determina su potabilidad, a excepción de las aguas de alta montaña (debido a su grado de pureza y su alta agresividad) y algunas insalubres que sí podrían emplearse. Además de esto, es de gran importancia que el agua no tenga un pH inferior a 5, ni las que contengan grasas o hidratos de carbono. Sin embargo, el empleo de aguas marinas está permitido tanto para el amasado como para el curado, y solamente para hormigones que no contengan armadura.

3.1.2.4 Aditivos

Los aditivos son aquellas sustancias que se añaden al hormigón antes del amasado, y que tienen por objeto modificar ciertas características: puesta en obra, fraguado y endurecimiento, mayor durabilidad, etc. Su dosificación no suele exceder el 5% del peso del cemento, ya que podría ser contraproducente y actuar contra el propio hormigón de forma indeseable.

El Código Estructural define de la siguiente manera los diferentes aditivos:

TIPO DE ADITIVO	FUNCIÓN PRINCIPAL
Reductores de agua / plastificantes	Disminuir el contenido de agua de un hormigón para una misma trabajabilidad o aumentar la trabajabilidad sin modificar el contenido de agua.
Reductores de agua de alta actividad / superplastificantes	Disminuir significativamente el contenido de agua de un hormigón sin modificar la trabajabilidad o aumentar significativamente la trabajabilidad sin modificar el contenido de agua.
Modificadores de fraguado / aceleradores, retardadores	Modificar el tiempo de fraguado de un hormigón.
Inclusores de aire	Producir en el hormigón un volumen controlado de finas burbujas de aire, uniformemente repartidas, para mejorar su comportamiento frente a las heladas.
Multifuncionales	Modificar más de una de las funciones principales definidas con anterioridad.
Moduladores de la viscosidad	Limitar la segregación mediante la mejora de la cohesión.

Tabla 5: Clasificación de aditivos según el Código estructural [18].

3.1.3 Tipos de hormigones

En función del empleo o características del hormigón se pueden distinguir varios tipos:

- **Hormigón en masa:** El hormigón en masa es un excelente material que posee una gran resistencia a compresión. Como se ha indicado previamente, el hormigón por sí mismo no es capaz de aguantar esfuerzos a tracción, y por lo tanto, queda restringido para usos estructurales.

- **Hormigón armado:** Este tipo de hormigones se obtienen tras la combinación de hormigón y acero de refuerzo (armadura). El objetivo es conformar una estructura capaz de resistir esfuerzos a compresión (mediante el hormigón) y de tracción (mediante el acero). Para que ambos materiales trabajen conjuntamente es necesario que haya adherencia entre ellos y que el hormigón recubra las barras de acero. Este tipo de hormigones, además de definir la dosificación del hormigón, requiere de un cálculo para determinar la cuantía mínima de armadura.



Imagen 10: Pilares de hormigón armado.

- **Hormigón pretensado:** El hormigón pretensado utiliza una técnica empleada en la construcción que se basa en someter intencionadamente al hormigón a esfuerzos de compresión previos a su puesta en servicio. Dichos esfuerzos se consiguen mediante barras, alambres o cables que son tensados y anclados al hormigón. Este esfuerzo de pretensado se puede transmitir al hormigón de dos maneras:

- **Armaduras pretesas:** Generalmente son barras que se tensan, se mantienen tensadas y se embeben en hormigón fresco formando una pieza. Una vez que el hormigón ha fraguado, se sueltan los anclajes de las barras y el hormigón queda comprimido. Suele emplearse en elementos prefabricados.



Imagen 11: Armaduras pretesas.

- **Armaduras postesas:** Generalmente son barras que se introducen en huecos dentro de las piezas de hormigón y se tensan una vez fraguado. Suele emplearse en tableros de puentes.

- **Hormigón autocompactante:** Este tipo de hormigones tienen como característica principal la consistencia fluida, es decir, son capaces de fluir y rellenar cualquier parte del encofrado simplemente por la acción de su propio peso y sin la necesidad de compactación. Son hormigones con mayor cantidad de finos que gruesos, y por lo tanto, tienen una granulometría continua, además de emplear una cantidad mínima de 350 kg/m³ de cemento.

- Hormigón de alta resistencia: Se denomina hormigón de alta resistencia aquel que tiene una resistencia mayor a 50Mpa. El inconveniente de este tipo de hormigones es la cantidad de agua a emplear, ya que se busca minimizar al máximo para obtener la mayor resistencia posible. Esta reducción se ve afectada en la trabajabilidad, por lo tanto, es necesario emplear superfluidificantes que permiten reducir la cantidad de agua sin llegar a modificar su consistencia. A pesar de ser un hormigón con baja relación agua/cemento, siguen siendo hormigones trabajables, además de poco porosos y gran resistencia. Sin embargo, este tipo de hormigones requiere de gran cantidad de cemento (y de clase resistente elevada), generando un gran calor de fraguado y con el peligro de fisuración del hormigón. A pesar de necesitar un curado especial, son hormigones de calidad, que presentan una gran resistencia, buena trabajabilidad y durabilidad.

- Hormigón con fibras: Como se ha comentado anteriormente, el hormigón presenta una baja capacidad para resistir esfuerzos a tracción, por lo tanto, para mejorar estas propiedades mecánicas existe la posibilidad de realizarlo mediante la incorporación de fibras. Sin embargo, estas fibras deben cumplir ciertos parámetros, como por ejemplo el módulo de elasticidad, resistencia a tracción, forma, dimensiones, etc. La ventaja de este tipo de hormigones es que la distribución de las fibras dentro del hormigón es aleatoria, por lo tanto, es capaz de resistir esfuerzos desde cualquier dirección, aunque una alineación incorrecta de las fibras puede generar problemas. Además existe una gran variedad de fibras:



Imagen 12: Hormigón con fibras de acero.

- Fibras de acero: Empleadas para tableros de puentes o pistas de rodaje de aeropuertos.
- Fibras de polipropileno: No mejoran la resistencia a tracción del hormigón pero sí su tenacidad.
- Fibras de vidrio: Mejoran tanto la resistencia como la tenacidad del hormigón, sin embargo, tienen el inconveniente de ser atacadas por los álcalis del cemento.

- Hormigón proyectado: Son hormigones que se emplean para el sostenimiento y revestimiento de túneles y obras subterráneas, proyectado a gran velocidad a través de una manguera y boquilla. Al proyectar el hormigón a través de una manguera, se suele generar una parte de rechazo, es decir, suele haber una cantidad de hormigón que no ha sido capaz de adherirse a la capa de gunitado, por lo tanto, suelen ser hormigones que generan más residuos.



Imagen 13: Hormigón proyectado.

- Mortero: La fabricación de los morteros está basada en el empleo de materiales aglomerantes (como el cemento), arenas finas y aditivos, por lo tanto, la diferencia entre un hormigón convencional y el mortero es la ausencia del árido grueso. Presentan una gran trabajabilidad, sin embargo, contienen menores resistencias.

3.2 Residuos de construcción y demolición (RCD)

El origen de los residuos de construcción y demolición (RCD), tal y como su nombre indica, proviene de la construcción o demolición de edificaciones o infraestructuras, además de reparaciones o producción de materiales nuevos para la construcción. Por lo tanto, la composición de los RCD varía en función del tipo de construcción, clasificándose de la siguiente manera:



Imagen 14: Clasificación del sector de la Construcción.

Cabe destacar que la composición de las edificaciones varía en el tiempo, y por consiguiente, los RCD. Además, depende de otros factores como el clima del lugar, el poder adquisitivo de la población, materias primas o técnicas constructivas.

Debido a los diferentes materiales que se encuentran en una demolición, es necesario realizar una separación selectiva, clasificándolos de la siguiente manera [19]:

- Categoría I: Son aquellos residuos de construcción y demolición que contienen sustancias peligrosas.
- Categoría II: Son residuos inertes "sucios", sin una selección previa en origen y sin la posibilidad de realizar una buena valorización al presentarse en forma de mezcla heterogénea.
- Categoría III: Son residuos inertes "limpios", seleccionado previamente en origen y entregado de forma separada, facilitando su valorización.
 - Hormigones, morteros, piedras o áridos.
 - Ladrillos o azulejos.
- Categoría IV: Son residuos inertes, adecuados para su uso en obras de restauración, acondicionamiento y relleno.

3.2.1 Proceso de reciclaje de los RCD

El proceso de reciclaje de los RCD consiste en transformar los materiales demolidos en fracciones de menor tamaño. Este proceso se lleva a cabo en plantas de reciclaje, que se caracterizan por el número de etapas de reciclaje y tipos de trituración, influyendo directamente en las características de los áridos reciclados.

Las etapas de reciclaje comprenden procesos como la trituración, cribado y clasificación, con el objetivo de eliminar contaminantes como barras metálicas, plástico o vidrio. Para ello, se hacen pasar los RCD por una trituradora primaria, con capacidad para manejar barras o piezas grandes de hormigón.

A continuación, los desechos de hierro se eliminan mediante un separador magnético, mientras que el material restante pasa por varios tamices. Finalmente, las partículas de gran tamaño se trituran nuevamente en una trituradora secundaria para reutilizar la cantidad máxima posible.

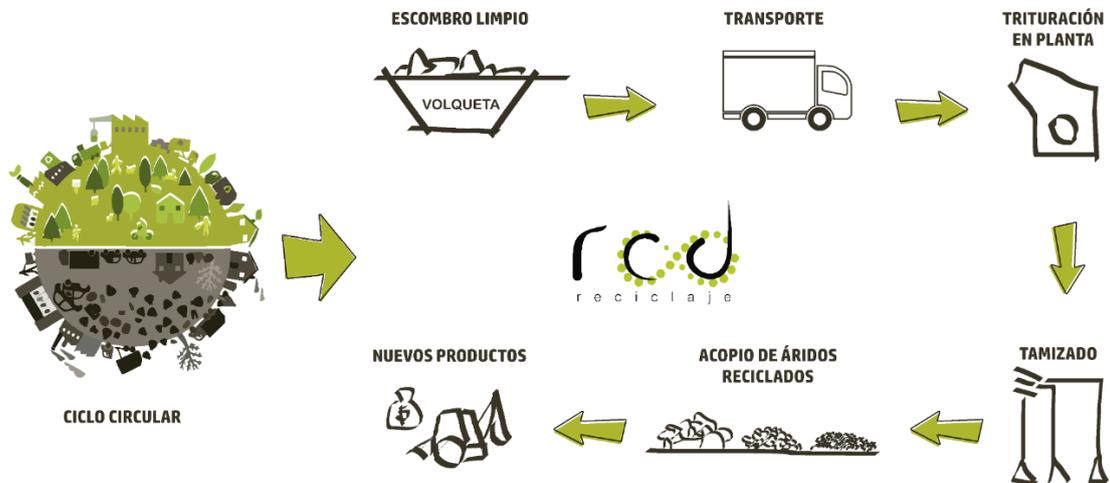


Imagen 15: Proceso de reciclaje de los Residuos de Construcción y Demolición.

La calidad de los áridos reciclados dependerá en gran parte de la cantidad de mortero que contengan, y ante esta situación, hay plantas encargadas capaces de eliminarlo. Para ello, llevan a cabo un calentamiento del árido reciclado, puesto que las altas temperaturas generan grietas en el mortero adherido.

Investigaciones recientes demostraron que con el método de “Calentamiento y Clasificación HS-RK”, se pueden obtener áridos naturales solamente con un 2% de mortero tras una calentamiento de 700°C en un horno rotatorio [20]. También se presentó el método de “Calentamiento y Frotamiento HR-F”, en el cual las piezas de hormigón se calientan a 300°C durante 2 minutos utilizando una trituradora de impacto y un horno de microondas especial [21]. Generalmente, el mortero se elimina fácilmente con temperaturas más altas, sin embargo, se ven reducidas las propiedades mecánicas de los RCD cuando se superan los 500°C.

También se pueden emplear técnicas húmedas para la eliminación del mortero. En este método, los RCD se sumergen en agua durante 2 horas para saturar completamente el mortero adherido. Posteriormente, se lleva a cabo un proceso de secado a 500°C durante 2 horas, y finalmente se introducen en agua fría [22].

3.2.2 Trabajabilidad

Tal y como se ha comentado en el apartado 3.1.2.2 *Áridos*, la forma de los áridos influye directamente en la trabajabilidad del hormigón. Para la misma trabajabilidad, los áridos redondeados requieren menos cantidad de agua de mezclado que los áridos de forma angular. Además, los áridos irregulares contienen una superficie específica mayor, por lo tanto, pueden dar resultados de relleno irregulares formando nichos de cemento. Sin embargo, los áridos de forma angular ofrecen una mayor adherencia al mortero, y por consiguiente, una mayor resistencia mecánica.

Otra consideración importante es que los áridos reciclados contienen mayor capacidad de absorción de agua, lo que da como resultado un hormigón con peor trabajabilidad y menor control en la relación agua/cemento [23].

3.2.3 Porosidad

El hormigón es un material poroso, independientemente del árido que se haya empleado. Los vacíos en el hormigón pueden aparecer por exceso de agua, aire incorporado durante el amasado o fisuras de diferente origen, y que debido a la interconexión de estos huecos el hormigón se vuelve un material permeable.

Como ya se ha comentado en el apartado 3.2.2 *Trabajabilidad*, los áridos reciclados contienen mayor capacidad de absorción de agua, por lo tanto, estos hormigones requieren mayor cantidad de agua, y por consiguiente, se obtendrá un hormigón más poroso. Además, los vacíos existentes en el hormigón facilitan la propagación de las fisuras, reduciendo la resistencia del hormigón y haciéndolo más susceptible a la agresión de los agentes externos, reduciendo ligeramente la durabilidad.

Dado que la densidad es la relación entre la masa y el volumen, y debido a su porosidad, los hormigones de áridos reciclados tendrán menor densidad que los hormigones con áridos naturales [24].

3.2.4 Características mecánicas

Al igual que en el hormigón convencional, las propiedades mecánicas mejoran cuanto mayor es la edad del hormigón. Sin embargo, a medida que se aumenta la cantidad de sustitución del árido natural por el árido reciclado, peores prestaciones mecánicas presenta, tanto la resistencia a compresión como la resistencia a tracción. Además, el módulo de elasticidad se reduce a medida que aumenta el contenido de áridos naturales, siendo la disminución más notoria cuando el árido reciclado contiene mayores cantidades de mortero [24].

3.3 Escorias de Acería de Horno de Arco Eléctrico

Las escorias de acería, tal y como describe el departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial y Vivienda del País Vasco [25], son materiales de origen industrial procedentes de la fabricación del acero en hornos de arco eléctrico (HEA), formados durante el proceso de fusión, afino o elaboración de acero. Durante este proceso de fabricación, se diferencian dos etapas:

1. Metalurgia primaria o fusión: En esta primera etapa, se obtiene un subproducto llamado **escoria negra**. Permite reducir el consumo de energía y el tiempo de fusión, por lo tanto, reduce el ataque químico del acero sobre el horno, y este a su vez, mejora la calidad del acero.
2. Metalurgia secundaria o afino: Tras un proceso de arrabio, se obtiene un subproducto denominado **escoria blanca**. Sin embargo, este tipo de material no suele tener una salida al mercado debido a su gran inestabilidad y expansividad [25].

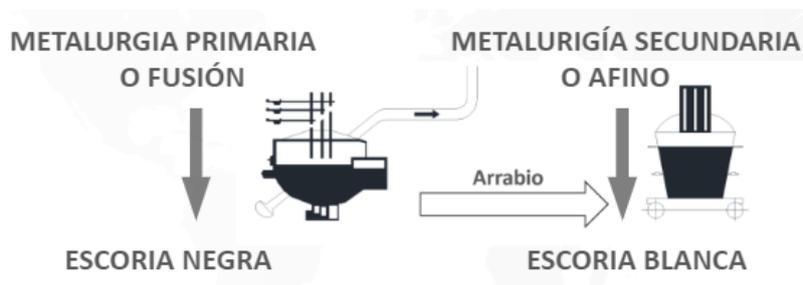


Imagen 16: Las diferentes etapas durante el proceso de fabricación.

Los áridos calizos provienen de la cantera, tras un proceso de extracción, machaqueo y cribado. En cambio, como ya hemos comentado, los áridos siderúrgicos provienen de un proceso industrial, tras una primera fusión en horno de arco eléctrico (metalurgia primaria), un enfriamiento y una desferretización, machaqueo, cribado, riego y volteo. El objetivo de estas plantas siderúrgicas es optimizar la calidad de las materias primas, siendo la chatarra la materia prima principal, además de asegurar un cierre de ciclos de los recursos naturales.

Las escorias negras presentan una gran cantidad de cal, sílice, magnesia, alumina y óxidos de hierro. Estas no presentan propiedades hidráulicas, por lo tanto, su mayor potencial de aprovechamiento radica en valorizarlo como material granular, es decir, en áridos siderúrgicos.

Sin embargo, el proceso de producción del acero produce cinco tipos de residuos:

1. Polvos de acería: Son partículas finas y que debido a su composición de hierro, zinc y metales pesados, son difíciles de valorizar.
2. Cascarillas de laminación: Se producen a la hora de tratar el acero para darle forma. Son empleadas como aditivo para las aleaciones de hierro.
3. Arenas de fundición: Proceden de los moldes obsoletos tras el proceso de colada, constituidas principalmente por cuarzo y arcilla. Se emplea como árido de hormigón o como agregado en la fabricación de ladrillos.
4. Refractarios: Son partes desgastadas del material utilizado para recubrir el horno y están compuestos por elementos silíceos.

5. Escorias de acería: Se generan por la neutralización de óxidos ácidos y básicos que flotan en el baño de fundición del metal.



Imagen 17: Los cuatro tipos de residuos que genera el proceso de producción del acero (polvos de acería, cascarillas de laminación, arenas de fundición y escorias de acería).

Asimismo, intervienen varios factores que influyen directamente en la composición de la escoria, como el tipo de chatarra, las diferentes técnicas y procesos de realización. De todas maneras, se pretende valorizar adecuadamente cada subproducto, con el objetivo de favorecer la economía circular, cerrando el bucle económico-ecológico y que además presenta otros beneficios de gran interés:

- Presenta una gran dureza y resistencia.
- Tiene una mayor densidad que el árido natural, por lo que es adecuado para obras marítimas dónde el peso de la estructura debe ser mayor.
- Resulta más económico que el árido natural.
- Se evita el traslado a vertederos.

3.4 Granulometría

La granulometría es la distribución de los distintos tamaños de los granos que componen un árido, y esta distribución de tamaños da lugar a una curva granulométrica, obtenida a través de una representación gráfica donde se analiza una cantidad determinada de material en función del tamaño de las partículas [26]. Este tipo de análisis se puede realizar mediante dos métodos:

1. Análisis granulométrico por tamizado (empleado en este caso): Consiste en pasar una muestra de material por diferentes tamices, colocados de mayor a menor abertura, agitándolos para hacer pasar la muestra. Con este procedimiento se consigue determinar el porcentaje retenido en cada tamiz, y así poder representarlo gráficamente.
2. Análisis granulométrico por sedimentación: El análisis se basa en la “ley de Stoke”, que tiene por objeto relacionar la velocidad de sedimentación de una partícula en un fluido.



Imagen 18: Tamizado.

En cuanto a la representación gráfica, lo más usual es emplear diagramas semilogarítmicos, donde el eje de abscisas representa el tamaño de los tamices en una escala logarítmica de base 10 y el eje de ordenadas representa el porcentaje retenido en cada tamiz (en una escala aritmética del 0 al 100%).

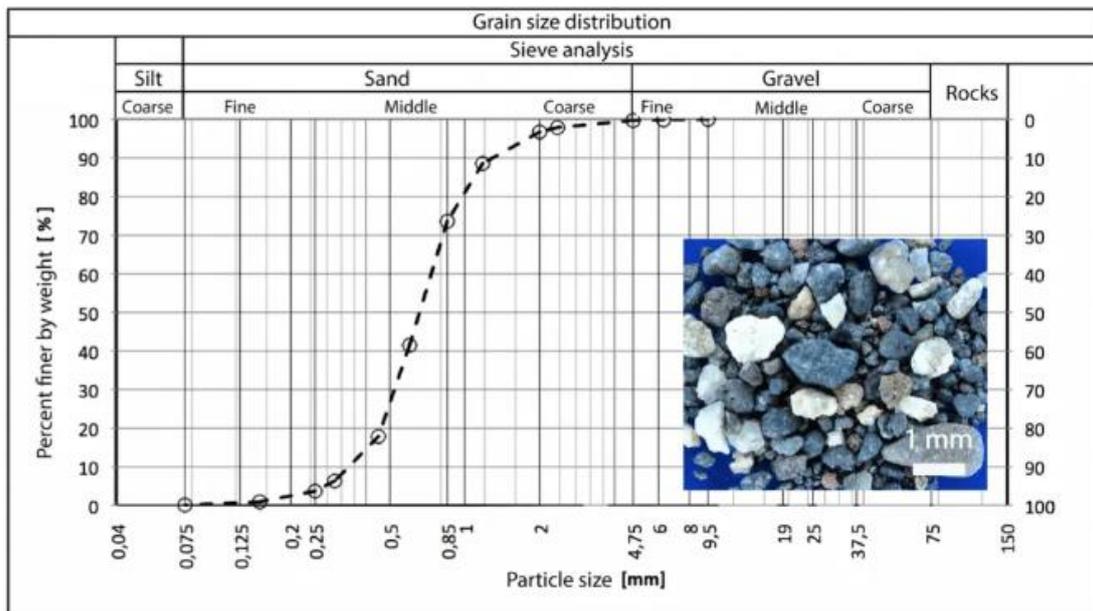


Imagen 19: Representación de la curva granulométrica.

3.4.1 Principio de Fuller

El principio de Fuller se basa en una curva teórica en el que incluye solamente el árido total, es decir, la grava o árido grueso y la arena o el árido fino. Consiste en una forma parabólica donde se aproxima a la máxima densidad y mínimo contenido de huecos que pueda tener un material, y por lo tanto, para granulometrías continuas.

ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE HORMIGONES CON SUBSTITUCIÓN TOTAL DE ÁRIDO GRUESO POR SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES (ESCORIA DE ACERÍA) Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

Se suele emplear en casos de hormigón armado, cuyo tamaño máximo del árido sea de 50 mm. Para obtener la curva, se suele emplear la siguiente ecuación:

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

Donde:

p = porcentaje en peso que pasa por el tamiz

d = abertura (diámetro) de cada tamiz.

D = tamaño máximo (diámetro) del árido.

Imagen 20: Ecuación para obtener el porcentaje de peso que pasa por el tamiz.

3.4.2 Principio de Bolomey

Al igual que en el caso anterior, el principio de Bolomey también se basa en una curva teórica (parabólica). La diferencia radica en la consideración de los áridos y cemento, por lo que su campo de aplicación es más amplio que la parábola de Fuller.

A continuación se muestra la representación teórica de ambas curvas, definida en la tabla y gráficamente.

Tamices UNE	Fuller	Bolomey
0	0,0	12,0
0,063	7,2	18,4
0,125	10,2	21,0
0,25	14,4	24,7
0,5	20,4	30,0
1	28,9	37,4
2	40,8	47,9
4	57,7	62,8
8	81,6	83,9
10	91,3	92,3
12,5	102,1	101,8
14	108,0	107,1
16	115,5	113,6
20	129,1	125,6
22,4	136,6	132,2
25	144,3	139,0
31,5	162,0	154,6
63	229,1	213,6

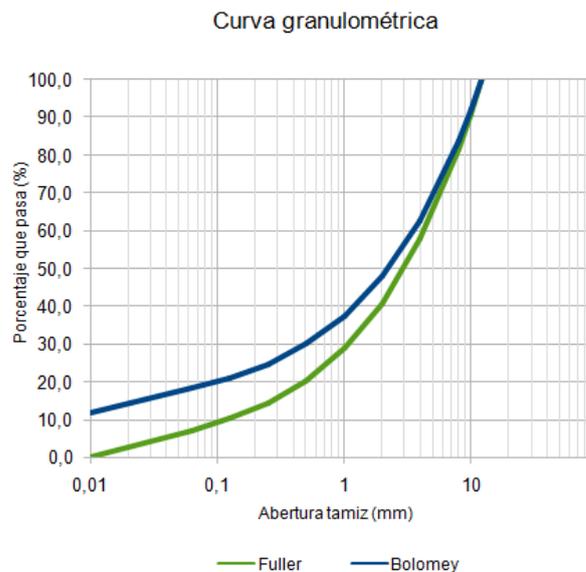


Imagen 21: Representación teórica de las curvas de Bolomey y Fuller.

Como se puede observar, por el tamiz 0 de la curva de Bolomey pasa una cantidad y la razón de esto simplemente es por la consideración del cemento.

3.5 Tecnología del hormigón

3.5.1 Dosificación

Se denomina dosificación del hormigón a la fórmula empleada para su fabricación, considerando las cantidades exactas de los materiales a emplear. Se trata de un método experimental, en el que es necesario conocer los aspectos como la granulometría de los áridos, su textura, su forma, la categoría del cemento, su granulometría y los aditivos [27]. Para ello, es fundamental determinar una dosificación previa que permita realizar la comprobación experimental con garantías. Para determinar esta dosificación previa, es necesario considerar ciertos datos iniciales de proyecto:

- Resistencia característica: Especificada en proyecto.
- Consistencia del hormigón: Definida por la norma española mediante el Cono de Abrams y especificada en proyecto.
- Características de los materiales.

Uno de los indicadores más importantes a la hora de realizar una dosificación es la relación agua/cemento, limitada por la normativa puesto que está relacionada directamente con la resistencia a compresión del hormigón. Además de esto, es fundamental determinar la proporción de la mezcla de los áridos finos y gruesos (mediante un análisis granulométrico), con el objetivo de lograr un hormigón resistente y trabajable. En cuanto a los aditivos, es de suma importancia determinar el tipo de aditivo y la cantidad a emplear, ya que un exceso podría ser contraproducente llegando a reducir la resistencia final.

3.5.2 Compactación

Definida la dosificación, se procede al amasado del hormigón, que hasta obtener el producto final pasará por distintas etapas. La primera de ellas, una vez vertido, trata sobre la compactación. Se considera un proceso fundamental para eliminar las coqueras y porosidad que se produce en el hormigón fresco, alcanzando mayores resistencias e impermeabilidad.

Por lo general, resulta importante obtener hormigones impermeables, ya que puede reducir la durabilidad de éste a través del aumento de la corrosión de las armaduras.

Para que el hormigón resulte compacto, se empleará un medio de consolidación en función de la consistencia con el objetivo de eliminar los huecos y obtener un material homogéneo. A continuación, se presentan los medios más comunes:

1. Apisonado: Para elementos de gran volumen, poco armados y consistencia seca o plástica.
2. Picado con barra: Para elementos de menor volumen, armados y hormigones fluidos.
3. Vacío: Ejerce presión sobre el hormigón eliminando las burbujas del interior, tanto de aire como de agua.
4. Centrifugación: Para elementos con secciones huecas y consistencia plástica o blanda.
5. Por choque: Para hormigones secos y tongadas de poco espesor.



Imagen 22: Vibrado del hormigón.

6. Vibración: Elimina el rozamiento entre las partículas de los áridos.

- Vibración interna (en zonas de gran armado).
- Vibración superficial.
- Vibración de encofrado.

7. Rodillo vibrante: Para grandes masas de hormigón, como presas o carreteras.

3.5.3 Fraguado y endurecimiento

Una vez compactado, se produce el fenómeno llamado fraguado del hormigón, etapa donde se genera el proceso de endurecimiento y pérdida de plasticidad, que se obtiene tras la desecación producida por la reacción química del agua de amasado con el cemento.

Como referencia, el cemento Portland fragua entre 4 y 20 horas después del amasado, y con una temperatura ambiental de 20°C. A partir del fraguado, el hormigón adquiere paulatinamente las propiedades mecánicas exigidas, hasta edades superiores a 28 días.

Por lo general, el agua de amasado suele ser el doble de lo requerido para generarse la reacción química, con el fin de lograr una mayor trabajabilidad. Durante el fraguado se da un proceso exotérmico, pudiendo llegar a temperaturas de 80°C, por lo tanto, la velocidad de fraguado se verá afectada por las condiciones ambientales (en mayor parte la temperatura ambiente).



Imagen 23: Fraguado del hormigón.

En casos de climas extremos, donde se prevean temperaturas inferiores a 0°C o superiores a 40°C se suspenderá el hormigonado, aunque también será de suma importancia considerar el riesgo de heladas, soleamiento directo o viento fuerte. Sin embargo, puede darse un tratamiento térmico a los componentes para elevar la temperatura, proceder al enfriamiento del agua e incluso enfriar los áridos, ajustándose siempre a las circunstancias del momento.

Cabe mencionar que el tipo de cemento también influye en la velocidad de fraguado, cuanto mayor sea la calidad, mayor será la velocidad.

3.5.4 Retracción

Durante la fabricación del hormigón se da un movimiento de humedad dentro del material, debido al gradiente de humedad entre el medio ambiente y la estructura, generando el fenómeno de la retracción. Dependiendo del momento de aparición de éste, se le denominará retracción plástica (antes del fraguado) o retracción hidráulica (posterior al fraguado).

Los áridos porosos pueden llegar a afectar a la retracción hidráulica, sin embargo, cuanto mayor es la proporción de áridos inertes en el conglomerado menor será la retracción que pueda darse.



Imagen 24: Retracción del hormigón.

Respecto al cemento, es de gran valor considerar su dosificación, la finura y su composición química. Cabe destacar, que cuanto mayor sea la cantidad de cemento y la relación de agua/cemento, mayor será la retracción.

3.5.5 Curado

Finalmente, tras el fraguado y endurecimiento del hormigón, se produce el proceso de curado. Consiste en una serie de operaciones que se realizan para el control de la humedad y temperatura del hormigón, con el objetivo de conseguir la resistencia requerida, impermeabilidad y durabilidad.

Es importante llevar a cabo un buen curado, puesto que la evaporación del agua puede alterar la relación agua/cemento y por consiguiente dejar incompleta la reacción química. Existen varios tipos de curado para evitar esto y controlar las condiciones de humedad y temperatura del hormigón:

- Riego periódico: Consiste en regar las superficies hormigonadas con una manguera con el fin de que se produzca la evaporación del agua aportada y dejando intacta el agua de amasado.
- Inmersión: Consiste en sumergir en agua el elemento de hormigón, y por lo tanto, no se producirá esa pérdida de agua por evaporación. Consiste en un método muy efectivo empleado en elementos prefabricados.
- Pulverización de agua: Se emplean unos equipos similares a los aspersores, con el fin de disminuir la temperatura ambiental y aportando la humedad necesaria para el curado.
- Protección de la superficie: Consiste en la colocación de elementos sobre la superficie del hormigón para evitar la evaporación del agua.



Imagen 25: Riego del hormigón para el curado.

3.5.6 Características del hormigón

Es de suma importancia conocer las características que debe tener el hormigón a la hora de proyectarlo, puesto que los factores como el lugar, el uso, las materias primas o el proceso de fabricación pueden influir negativamente en su comportamiento. A continuación se presentan las características más destacables que posee el hormigón:

- Resistencia mecánica: La principal característica del hormigón es resistir los esfuerzos a compresión. Sin embargo, su resistencia a tracción como al esfuerzo cortante es relativamente baja, por lo que suele combinarse con elementos de acero (barras o fibras) para mejorar sus propiedades.
- Durabilidad: La durabilidad se define como la capacidad para comportarse adecuadamente frente a las acciones físicas y químicas a lo largo de la vida útil de la estructura, protegiendo los elementos (metálicos) embebidos en el hormigón. Para garantizar la durabilidad del hormigón es necesario realizar un hormigón con baja permeabilidad, una relación de agua/cemento baja y un cuidado en el curado exhaustivo, además de considerar el tipo de ambiente al que se va a someter (químico agresivo, zona hielo-deshielo, etc.).

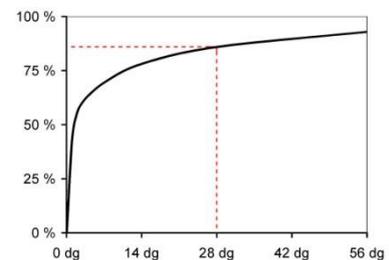


Imagen 26: Evolución de la resistencia del hormigón con la edad.

- Capacidad aislante: Debido a la alta densidad, el hormigón es mal aislante térmico, sin embargo, posee buen aislamiento hidrófugo y acústico.
- Versatilidad: Se trata de un material fluido, y por lo tanto moldeable, por lo que puede adaptarse a prácticamente cualquier tipo de encofrado.

3.5.7 Problemas y patologías del hormigón

Como ya se ha comentado en el apartado 3.1 *Hormigón*, el hormigón está compuesto por cemento, áridos, agua y aditivos, y cada uno de ellos puede presentar problemas específicos:

- Cemento: Puede generarse un falso fraguado debido a la hidratación rápida del yeso, además de la retracción hidráulica o retracción por exceso de calor de hidratación.
- Áridos: Un exceso de áridos finos o áridos alargados pueden generar hormigones de baja resistencia, puesto que requieren mayor cantidad de agua.
- Aditivos: Son productos que añadidos al conglomerante mejoran sus propiedades, sin embargo, un exceso de aditivos puede llegar a ser contraproducente y generar hormigones de baja calidad.

Es de suma importancia llevar a cabo ciertas directrices durante la fabricación del hormigón, respetando la dosificación establecida anteriormente, realizando un vibrado adecuado o realizando un curado exhausto para evitar problemas posteriores. Pese a cumplir con lo exigido, pueden generarse los siguientes problemas debido a su manipulación:

- Segregación de los áridos: Consiste en la separación de sus partículas de forma que no presentan una distribución uniforme una vez amasado.
- Decoloración: El hormigón tendrá el mismo color siempre y cuando se empleen los mismos materiales a lo largo del proyecto. Sin embargo, alterando uno de los componentes, se podría provocar dicha alteración.
- Agrietamiento: Es un fenómeno que se da con mucha facilidad, puesto que depende de varios factores como el encogimiento por secado, la sedimentación del subrasante, la contracción térmica o las cargas aplicadas.
- Retracción plástica (deseccación): Ocurre cuando el hormigón es incapaz de retener la humedad y se da una evaporación temprana por la combinación de diferentes factores como la humedad relativa, la velocidad del viento y la temperatura del aire y del hormigón.
- Escamación: Consiste en el desprendimiento de la superficie del hormigón con un continuo descascaramiento. Ocurre en procesos de curado inadecuados o exposición a ciclos de hielo-deshielo.
- Rizado: Se da en casos en los que hay demasiado encogimiento en la parte inferior del hormigón. Por lo general, ocurre debido a variaciones en la humedad y temperatura entre diferentes superficies del elemento [28].
- Coqueras: Son una serie de irregularidades que se dan en la superficie del hormigón una vez desencofrado. Puede suponer un gran problema en caso de que haya armaduras vistas.



Imagen 27: Coqueras en un pilar de hormigón.

4. METODOLOGÍA

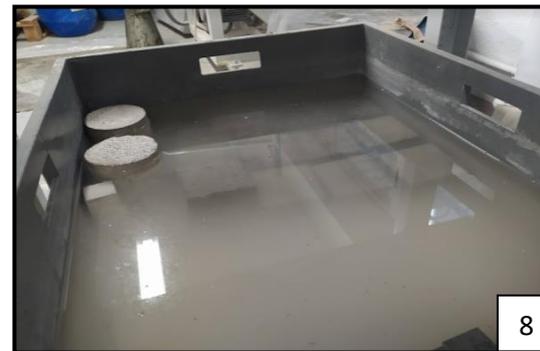
En este apartado se explicará el procedimiento de fabricación de las amasadas.

4.1 Equipos empleados

En primer lugar, se mencionarán los equipos empleados durante todo el experimento, tanto para el análisis granulométrico como para la fabricación del hormigón:

- Tamices ASTM: Se trata de un elemento que tiene como objetivo principal retener el material en función de la malla escogida. Durante el experimento se emplearon tamices de diferentes tamaños y en la imagen número 1 se puede apreciar el tamiz ASTM de 4 mm.
- Báscula: Aparato necesario para la medición de los materiales. En la imagen número 2 se puede apreciar el pesaje del árido reciclado.
- Recipientes: Para almacenar y pesar los materiales. Se puede apreciar en la imagen número 2.
- Vibrador de tamices: Máquina encargada de vibrar los tamices, necesaria para obtener el peso retenido en cada tamiz. Se puede apreciar en la imagen número 3.
- Pipeta: Se trata de instrumento volumétrico que permite medir con mayor precisión un líquido. En este caso se empleó una pipeta de 10 ml para medir el superplastificante.
- Hormigonera: Es el aparato encargado de elaborar el hormigón, suplantando el amasado de forma manual. En la imagen número 4 se puede apreciar la hormigonera basculante.
- Cono de Abrams: Se trata de un instrumento metálico destinado para la medición de la consistencia del hormigón en su estado fresco. Se puede apreciar en la imagen número 5.
- Metro: Empleado para medir el asentamiento del Cono de Abrams. En la imagen número 6 se puede apreciar un asentamiento de 5 cm.
- Molde cúbico cuádruple: Se trata de un molde de acero con capacidad para cuatro probetas cúbicas de 100x100x100 mm. Se puede apreciar en la imagen número 7.
- Recipiente de agua: Se trata de un recipiente lleno de agua para el curado del hormigón. Debido a que la norma exige una humedad del 95% hasta inmediatamente antes del ensayo, se procede a sumergirlas en agua para evitar pérdidas de humedad. Se puede apreciar en la imagen número 8.
- Horno de secado: Se trata de un equipo capaz de proporcionar unas condiciones de altas temperaturas y extraer la humedad de las probetas. Se puede apreciar en la imagen número 9.
- Máquina de ensayos: Se trata de un equipo que es capaz de determinar las capacidades mecánicas del hormigón. Se puede apreciar en la imagen número 10.

ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE HORMIGONES CON SUBSTITUCIÓN TOTAL DE ÁRIDO GRUESO POR SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES (ESCORIA DE ACERÍA) Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN



EQUIPOS
EMPLEADOS



4.2 Materias primas empleadas

4.2.1 Cemento

El cemento empleado durante el experimento es el CEM II/B-L 32,5 R (UNE-EN 197-1) suministrado por la empresa “Cementos Lemona”. Analizando el catálogo facilitado por la empresa podemos destacar las siguientes características:

- Clinker: 65-79 % en masa.
- Caliza: 21-35 % en masa.
- Componentes adicionales: 0-5 % en masa.
- Un principio de fraguado mayor a 75 minutos.
- Un final de fraguado inferior a 12 horas.
- Una expansión (según Le Chatelier) inferior a 10 mm.
- Una concentraciones de SO_3 y Cl menores a 3,5% y 0,10% respectivamente.

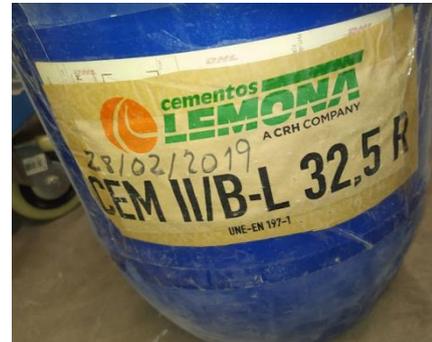


Imagen 28: El cemento empleado para el ensayo.

Además, presentan unas resistencias mecánicas considerables dentro de los valores exigidos por la normativa.

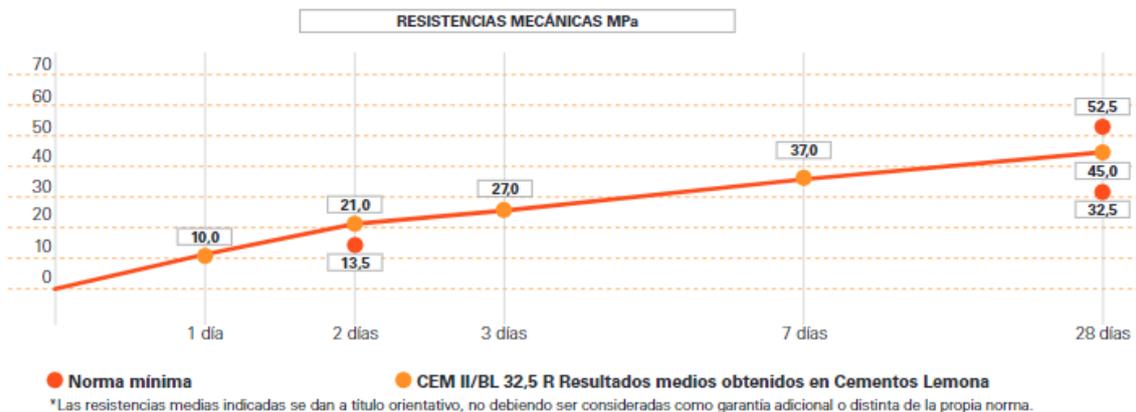


Imagen 29: Ficha técnica del CEM II/B-L facilitada por “Cementos Lemona” [29].

4.2.2 Agua

Se ha empleado el agua potable del laboratorio del Edificio I de la Escuela de Ingeniería de Bilbao, suministrada por el Consorcio de Aguas de Bilbao.

4.2.3 Árido natural

Como se ha comentado en el apartado 3.1.2.2 Áridos, los áridos se clasifican en función de la fracción obtenida entre la división del árido mínimo y el máximo, y por tanto, se obtiene una clasificación entre la arena y la grava.

Durante el experimento se han empleado los siguientes materiales, de origen desconocido:

- Arena caliza de 0-4 mm.
- Arena de sílice de 0-1 mm.
- Grava caliza de 4-16 mm.

A continuación se detallan las muestras de los diferentes materiales:



Imagen 30: Las diferentes muestras empleadas en el ensayo. De izquierda a derecha, arena caliza, arena de sílice y grava caliza.

4.2.4 Escoria negra

La escoria empleada durante el trabajo procede de la Acería Compacta de Bizkaia (ACB) ubicada en Sestao, también conocida como ArcelorMittal Sestao.

La planta industrial es capaz de producir bobinas de acero laminado a partir de chatarra y prerreducidos de hierro, combinando en un solo proceso todas las acciones necesarias [30].

Como se ha comentado anteriormente en el apartado 3.3 *Escorias de Acería de Horno de Arco Eléctrico*, durante el proceso de fabricación del acero se obtiene el subproducto de escorias, y que según su clasificación granulométrica se diferencian los siguientes materiales:

- Escoria fina 0-12 mm.
- Escoria gruesa de 0-25 mm.



Imagen 31: La escoria empleada durante el ensayo, tanto la arena como el árido grueso.

4.2.5 Residuos de construcción y demolición (RCD)

Los residuos de construcción y demolición empleados en el experimento provienen del derrumbe de la chimenea de la Central Térmica de Anllares, ubicada en el Páramo de Sil (León). La chimenea de 150 metros de altura pertenecía a la central térmica de producción de electricidad por ciclo convencional alimentada con carbón, construida entre los años 1979 y 1982, y entrando en funcionamiento en este último año.

En la *Imagen 26* se puede apreciar el proceso del derrumbamiento de la chimenea:



Imagen 32: Proceso de derrumbamiento de la chimenea de la Central Térmica de Anllares. Fuente: Ana F. Barredo / EFE [31].

Para la demolición de la chimenea se emplearon un total 50 kilos de dinamita, y se recuperaron 3.550 toneladas de hormigón y 80 toneladas de hierro.

A continuación se mencionan los datos más relevantes sobre las muestras:

TOMA DE MUESTRA	
LUGAR	Central térmica de Anllares
Nº DE MUESTRA	M1-Chimenea
FECHA	23 de septiembre de 2021
TIPO DE MUESTRA	RCD (saco 3 de 4)
EMPRESA ENCARGADA	Lezama demoliciones

Tabla 6: Datos relevantes de la toma de muestra de los RCD.



Imagen 33: Muestra de los RCD.

4.2.6 Aditivos

Se ha empleado el aditivo superplastificante / reductor de agua MasterEase5038 suministrado por la empresa BASF, con el objetivo de mejorar la trabajabilidad del hormigón sin modificar el contenido de agua y con las siguientes características:

CARACTERÍSTICAS	
ESTADO	Líquido
COLOR	Turbio amarillento
DENSIDAD	1,05 ± 0,02 g/cm ³
CONTENIDO MÁXIMO EN CLORUROS	< 0,1% (UNE-EN 480-10)
CONTENIDO MÁXIMO EN CLORUROS ALCALINOS	< 1% (UNE-EN 460-12)
COMPORTAMIENTO FRENTE A LA CORROSIÓN	Solo contiene componentes del capítulo A1 de la norma UNE-EN 934-1:2009

Tabla 7: Características del aditivo empleado en el ensayo.

4.3 Análisis granulométrico

4.3.1 Procedimiento

Para determinar las diferentes dosificaciones del hormigón fue necesario realizar un análisis granulométrico de cada material.

Para ello, se emplearon unos tamices ensamblados en una columna y en orden descendente, vertiendo la muestra en el tamiz superior y con malla de mayor abertura. Como ya se ha comentado, se analizó cada material, por lo tanto, se emplearon dos tipos de columna de tamices, una para materiales gruesos (grava) y otro para materiales más finos (arena).



Imagen 34: Las columnas de tamices empleadas en el ensayo.

Tras un vibrado de estos tamices durante un tiempo determinado, se obtuvo el peso retenido en cada tamiz. En la *Tabla 8* se muestran diferentes materiales analizados y la suma del peso retenido en cada tamiz, expresado en gramos.

Tamices LABORATORIO	Arena	Escoria Fina	Grava	RCD	Escoria Gruesa
0	2005,4	2006,8	2106,5	2225,4	2000
0,075	1974	1996,9			
0,09	1894,4	1988,6			
0,125	1804,7	1981,9			
0,15	1704,9	1976,2			
0,18	1627,5	1970,5			
0,212	1546,4	1963,6			
0,3	1414,9	1941,1			
0,425	1284,7	1898,7	2036,4	2220	1994
0,85	915,6	1727,1	1991,8	2219,3	1992,7
2	119,4	1156	1925	2218	1992,4
3,35	2,7	498	1867	2201,1	1992
4,75	0,1	156,3	1680,6	1981,1	1940,5
5			1584,6	1876,8	1898,2
6,3			1251,5	1545,7	1659,3
9,5			284,8	183,4	738,3
13,2			4,9	0	16,7

Tabla 8: Suma del peso retenido en cada tamiz de los diferentes materiales.

ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE HORMIGONES CON SUBSTITUCIÓN TOTAL DE ÁRIDO GRUESO POR SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES (ESCORIA DE ACERÍA) Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

En el laboratorio se emplearon los tamices de acuerdo a la norma ASTM, y por lo tanto ha sido necesario realizar una interpolación para ajustarse a las exigencias del Código Estructural, tal y como se puede observar en la *Tabla 9*.

Tamices UNE	Arena	Escoria Fina	Grava	RCD	Escoria Gruesa
0	2005,4	2006,8	2106,5	2225,4	2000
0,063	1979,0	1998,5	2096,1	2224,6	1999,1
0,125	1804,7	1981,9	2085,9	2223,8	1998,2
0,25	1489,6	1953,9	2065,3	2222,2	1996,5
0,5	1219,6	1868,4	2028,5	2219,9	1993,8
1	811,7	1652,6	1983,1	2219,1	1992,7
2	119,4	1156	1925	2218	1992,4
4	1,5	339,4	1780,5	2099,0	1968,1
8	0	0	718,8	822,0	1170,0
10	0	0	215,8	158,6	640,8
12,5	0	0	51,0	34,7	153,2
14	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0
22,4	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0
31,5	0	0	0	0	0
63	0	0	0	0	0

Tabla 9: Suma del peso retenido en cada tamiz adaptado a las restricciones del Código Estructural.

Partiendo de la base de la suma del peso retenido en cada tamiz se procedió a determinar el porcentaje acumulado, para su posterior representación gráfica. Para ello ha sido necesario definir el porcentaje que pasa por cada tamiz, y por consiguiente, el peso. Finalmente, para la definición gráfica, se optó por representar en el eje de abscisas la abertura del tamiz y en el eje de ordenadas el porcentaje que pasa por cada tamiz.

A continuación, se muestran las tablas y curvas granulométricas de los diferentes materiales:

ARENA CALIZA 0-4 mm

ARENA CALIZA 0-4 mm ($\rho = 2.600 \text{ kg/m}^3$)				
Tamices UNE	Peso acumulado	Peso en cada tamiz	% que pasa por cada tamiz	% acumulado
0	2005,4	26,4	1,32	1,32
0,063	1979,0	174,3	8,69	10,01
0,125	1804,7	315,1	15,71	25,72
0,25	1489,6	270,1	13,47	39,19
0,5	1219,6	407,8	20,34	59,52
1	811,7	692,3	34,52	94,05
2	119,4	117,9	5,88	99,93
4	1,5	1,5	0,07	100,00
8	0,0	0,0	0,00	100,00
10	0,0	0,0	0,00	100,00
12,5	0,0	0,0	0,00	100,00
14	0,0	0,0	0,00	100,00
16	0,0	0,0	0,00	100,00
20	0,0	0,0	0,00	100,00
22,4	0,0	0,0	0,00	100,00
25	0,0	0,0	0,00	100,00
31,5	0,0	0,0	0,00	100,00
63	0,0	0,0	0,00	100,00

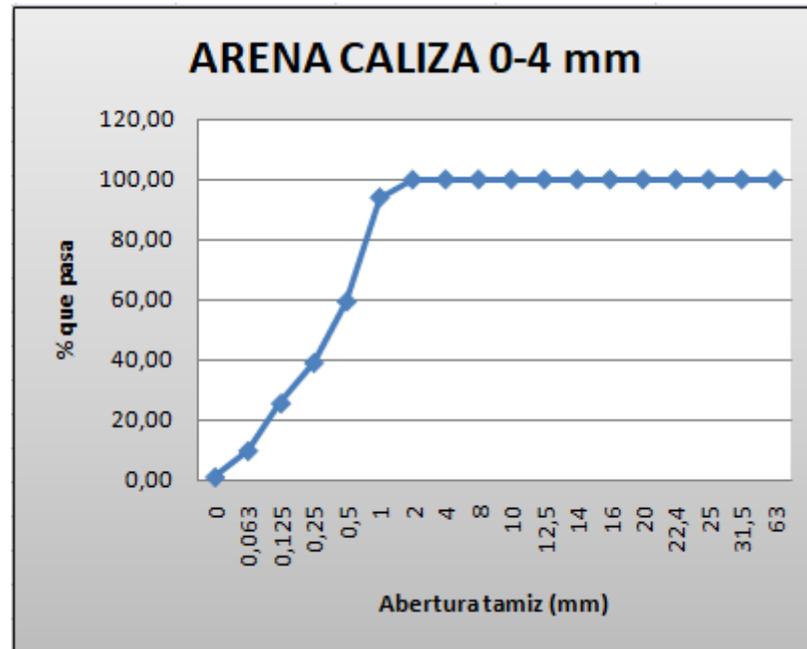


Imagen 35: Análisis granulométrico de la arena caliza.

GRAVA CALIZA 4-16 mm

GRAVA CALIZA 4-16 mm ($\rho = 2.600 \text{ kg/m}^3$)				
Tamices UNE	Peso acumulado	Peso en cada tamiz	% que pasa por cada tamiz	% acumulado
0	2106,5	10,4	0,49	0,49
0,063	2096,1	10,2	0,49	0,98
0,125	2085,9	20,6	0,98	1,96
0,25	2065,3	36,7	1,74	3,70
0,5	2028,5	45,4	2,16	5,86
1	1983,1	58,1	2,76	8,62
2	1925	144,5	6,86	15,48
4	1780,5	1061,6	50,40	65,88
8	718,8	503,0	23,88	89,75
10	215,8	164,8	7,82	97,58
12,5	51,0	51,0	2,42	100,00
14	0,0	0,0	0,0	100,00
16	0,0	0,0	0,0	100,00
20	0,0	0,0	0,0	100,00
22,4	0,0	0,0	0,0	100,00
25	0,0	0,0	0,0	100,00
31,5	0,0	0,0	0,0	100,00
63	0,0	0,0	0,0	100,00

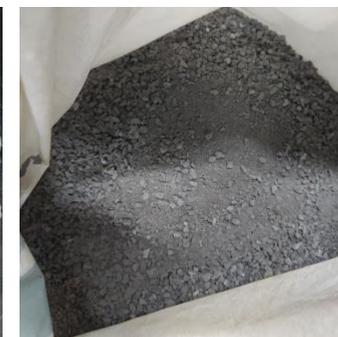
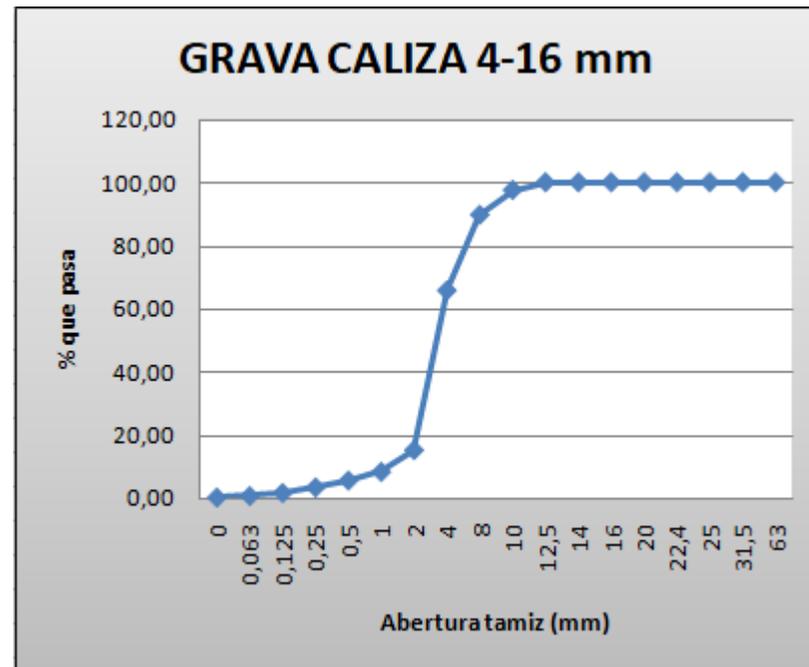


Imagen 36: Análisis granulométrico de la grava caliza.

RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD)

RCD ($\rho = 2.600 \text{ kg/m}^3$)				
Tamices UNE	Peso acumulado	Peso en cada tamiz	% que pasa por cada tamiz	% acumulado
0	2225,4	0,8	0,04	0,04
0,063	2224,6	0,8	0,04	0,07
0,125	2223,8	1,6	0,07	0,14
0,25	2222,2	2,3	0,11	0,25
0,5	2219,9	0,7	0,03	0,28
1	2219,1	1,1	0,05	0,33
2	2218	119,0	5,35	5,68
4	2099,0	1277,0	57,38	63,06
8	822,0	663,4	29,81	92,87
10	158,6	123,9	5,57	98,44
12,5	34,7	34,7	1,56	100,00
14	0,0	0,0	0,00	100,00
16	0,0	0,0	0,00	100,00
20	0,0	0,0	0,00	100,00
22,4	0,0	0,0	0,00	100,00
25	0,0	0,0	0,00	100,00
31,5	0,0	0,0	0,00	100,00
63	0,0	0,0	0,00	100,00

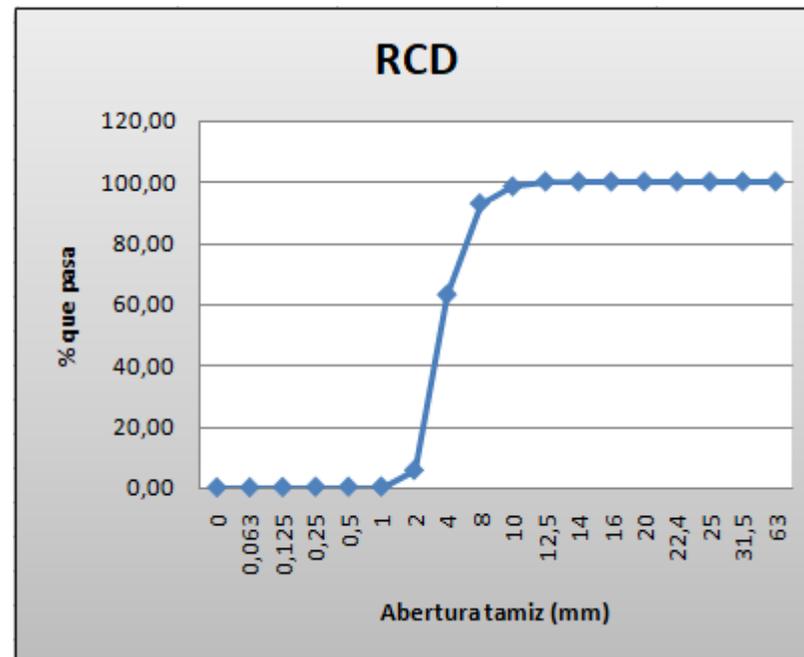


Imagen 37: Análisis granulométrico de los residuos de construcción y demolición.

ESCORIA GRUESA

ESCORIA GRUESA ($\rho = 3.200 \text{ kg/m}^3$)				
Tamices UNE	Peso acumulado	Peso en cada tamiz	% que pasa por cada tamiz	% acumulado
0	2000	0,9	0,05	0,05
0,063	1999,1	0,9	0,04	0,09
0,125	1998,2	1,7	0,09	0,18
0,25	1996,5	2,7	0,14	0,31
0,5	1993,8	1,1	0,05	0,36
1	1992,7	0,3	0,01	0,38
2	1992,4	24,3	1,22	1,60
4	1968,1	798,1	39,91	41,50
8	1170,0	529,2	26,46	67,96
10	640,8	487,6	24,38	92,34
12,5	153,2	153,2	7,66	100,00
14	0,0	0,0	0,00	100,00
16	0,0	0,0	0,00	100,00
20	0,0	0,0	0,00	100,00
22,4	0,0	0,0	0,00	100,00
25	0,0	0,0	0,00	100,00
31,5	0,0	0,0	0,00	100,00
63	0,0	0,0	0,0	100,00

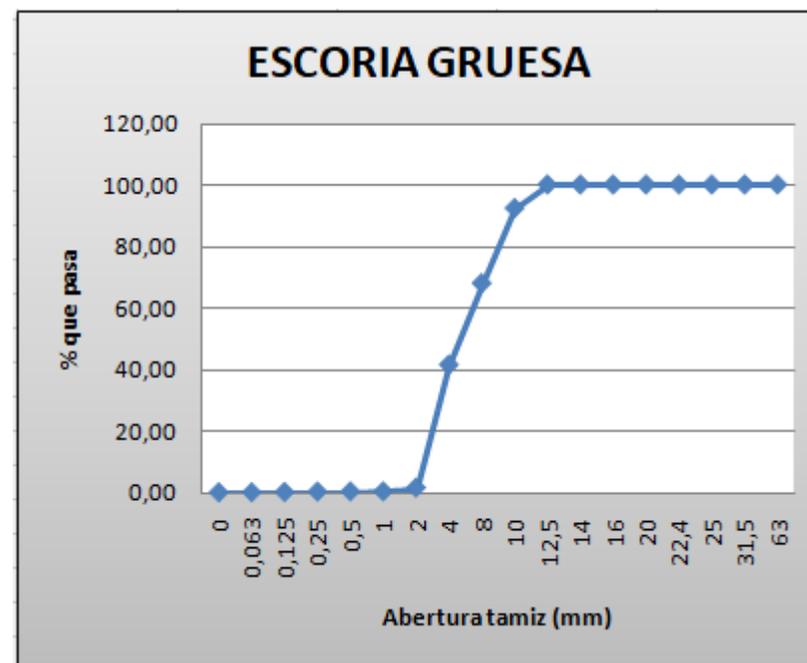


Imagen 38: Análisis granulométrico de la escoria gruesa.

ESCORIA FINA

ESCORIA FINA ($\rho = 3.200 \text{ kg/m}^3$)				
Tamices UNE	Peso acumulado	Peso en cada tamiz	% que pasa por cada tamiz	% acumulado
0	2006,8	8,3	0,41	0,41
0,063	1998,5	16,6	0,83	1,24
0,125	1981,9	28,0	1,40	2,64
0,25	1953,9	85,5	4,26	6,90
0,5	1868,4	215,8	10,75	17,65
1	1652,6	496,6	24,75	42,40
2	1156	816,6	40,69	83,09
4	339,4	339,4	16,91	100,00
8	0,0	0,0	0,00	100,00
10	0,0	0,0	0,00	100,00
12,5	0,0	0,0	0,00	100,00
14	0,0	0,0	0,00	100,00
16	0,0	0,0	0,00	100,00
20	0,0	0,0	0,00	100,00
22,4	0,0	0,0	0,00	100,00
25	0,0	0,0	0,00	100,00
31,5	0,0	0,0	0,00	100,00
63	0,0	0,0	0,00	100,00



Imagen 39: Análisis granulométrico de la escoria fina.

4.4 Dosificación y procedimiento de amasadas

4.4.1 Dosificación

Como ya se ha comentado anteriormente, el objetivo del estudio es realizar hormigones lo más sostenibles posible, por lo tanto, se ha empleado la cantidad mínima de cemento exigida por la normativa al tratarse del producto más contaminante del hormigón, siendo de 250 kg/m³.

Una vez definida la cantidad de cemento se podrá establecer la dosificación del aditivo, añadiendo un 1,5% de superplastificante respecto a la cantidad de cemento, siendo de 3,75 l/m³.

Al emplear poca cantidad de cemento, se estará trabajando con un hormigón seco, y por ello, se empleará la mayor cantidad de agua posible, limitada por la normativa, y por consiguiente una relación de agua/cemento de 0,65. Por lo tanto, se obtiene una cantidad de agua de 160 l/m³.

Para definir la dosificación, se limita como referencia un volumen de 1,025 m³. Para obtener dicho valor, será necesario realizar la división entre la dosificación y la densidad de cada material. A continuación, se muestra la expresión con los datos anteriormente mencionados:

$$\text{Dosificación} = \frac{D_{cem}}{\rho_{cem}} + \frac{D_{arena}}{\rho_{arena}} + \frac{D_{grava}}{\rho_{grava}} + \frac{D_{agua}}{\rho_{agua}} + \frac{D_{aditivo}}{\rho_{aditivo}} = 1.025 \text{ m}^3$$

$$\text{Dosificación} = \frac{250}{3100} + \frac{D_{arena}}{2600} + \frac{D_{grava}}{2600} + \frac{160}{1000} + \frac{3,75}{1000} = 1.025 \text{ m}^3$$

Como se puede observar, la arena y la grava contienen la misma densidad, y tras una simplificación se obtiene la cantidad de ambos elementos, que deberá ser 2.030 kg/m³. Sin embargo, la escoria contiene una densidad mayor, por lo tanto, la suma de la arena y la grava (de escoria) para que ocupe el mismo volumen deberá ser 2.360 kg/m³.

Para definir la dosificación de la arena y la grava se procede a realizar una curva combinada, con el objetivo de conseguir una curva lo más próxima a la curva de Fuller. Para ello, es necesario retomar los datos de porcentaje retenido en cada tamiz, calculados en el apartado 4.3 *Análisis Granulométrico*.

ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE HORMIGONES CON SUBSTITUCIÓN TOTAL DE ÁRIDO GRUESO POR SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES (ESCORIA DE ACERÍA) Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

Tamices UNE	Arena	Escoria Fina	Grava	RCD	Escoria Gruesa
0	0	0	0	0	0
0,063	1,32	0,41	0,49	0,04	0,05
0,125	10,01	1,24	1,0	0,07	0,09
0,25	25,72	2,64	2,0	0,14	0,18
0,5	39,19	6,9	3,7	0,25	0,31
1	59,52	17,65	5,9	0,28	0,36
2	94,05	42,4	8,6	0,33	0,38
4	99,93	83,09	15,5	5,68	1,6
8	100,0	100,0	65,9	63,06	41,5
10	100,0	100,0	89,8	92,87	67,96
12,5	100,0	100,0	97,6	98,44	92,34
14	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
16	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
20	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
22,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
25	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
63	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tabla 10: Datos calculados para determinar las dosificaciones.

Cabe recordar que se realizarán las siguientes amasadas:

- Amasada de referencia: Se empleará grava y arena caliza (hormigón convencional).
- Amasada de RCD: Se empleará arena caliza y grava RCD.
- Amasada de Escoria: Se empleará grava y arena de escoria.

Para cada tipo de amasada se realizarán combinaciones entre la grava y la arena hasta obtener la curva combinada óptima, empleando los datos de la *Tabla 10*. A continuación se muestran las opciones de las diferentes combinaciones y su representación gráfica:

COMBINACIONES POSIBLES					
/	Arena	Escoria Fina	Grava	RCD	Escoria Gruesa
REF.	45%	-	55%	-	-
RDC	55%	-	-	45%	-
ESC.	-	60%	-	-	40%

Tabla 11: Las diferentes combinaciones posibles de dosificaciones.

ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE HORMIGONES CON SUBSTITUCIÓN TOTAL DE ÁRIDO GRUESO POR SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES (ESCORIA DE ACERÍA) Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

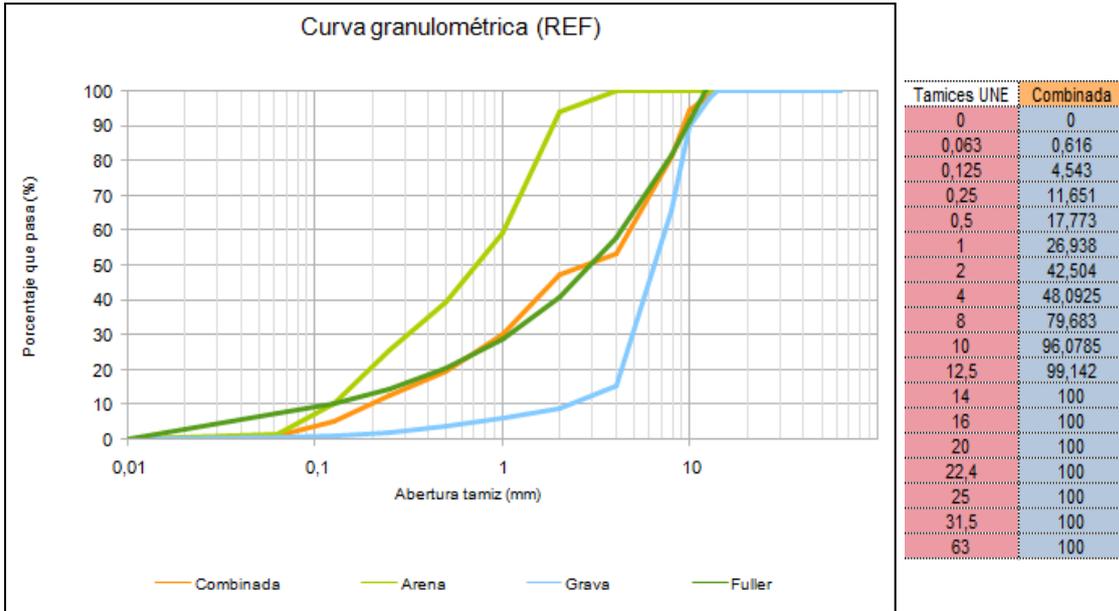


Imagen 40: Análisis granulométrico con 45% de arena y 55% de grava (caliza).

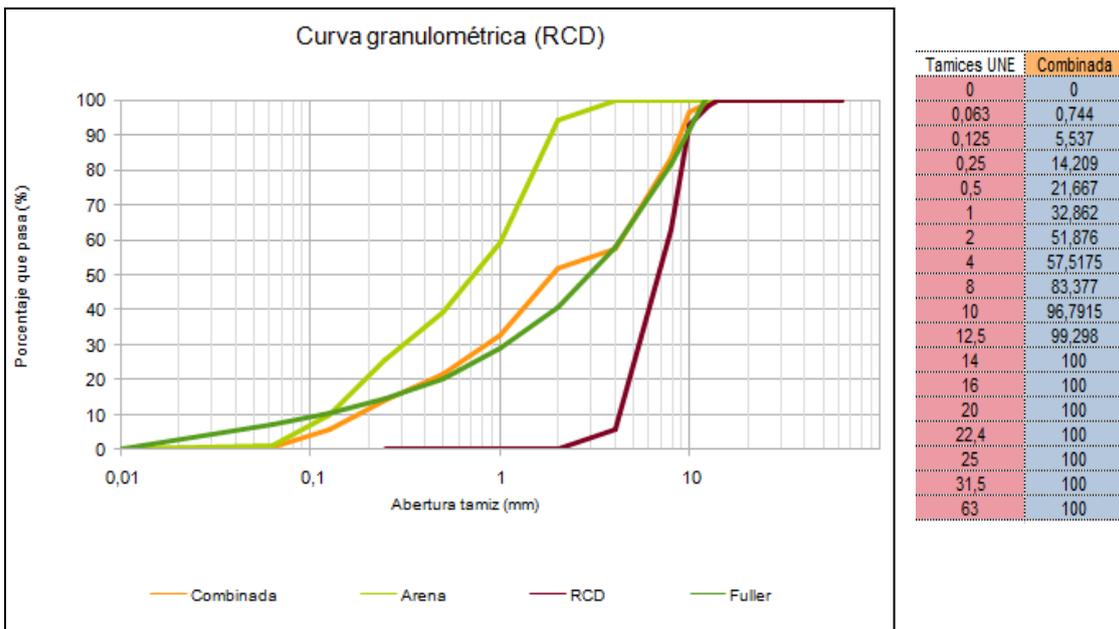


Imagen 41: Análisis granulométrico con 55% de arena (caliza) y 45% de grava (RCD).

ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE HORMIGONES CON SUBSTITUCIÓN TOTAL DE ÁRIDO GRUESO POR SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES (ESCORIA DE ACERÍA) Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

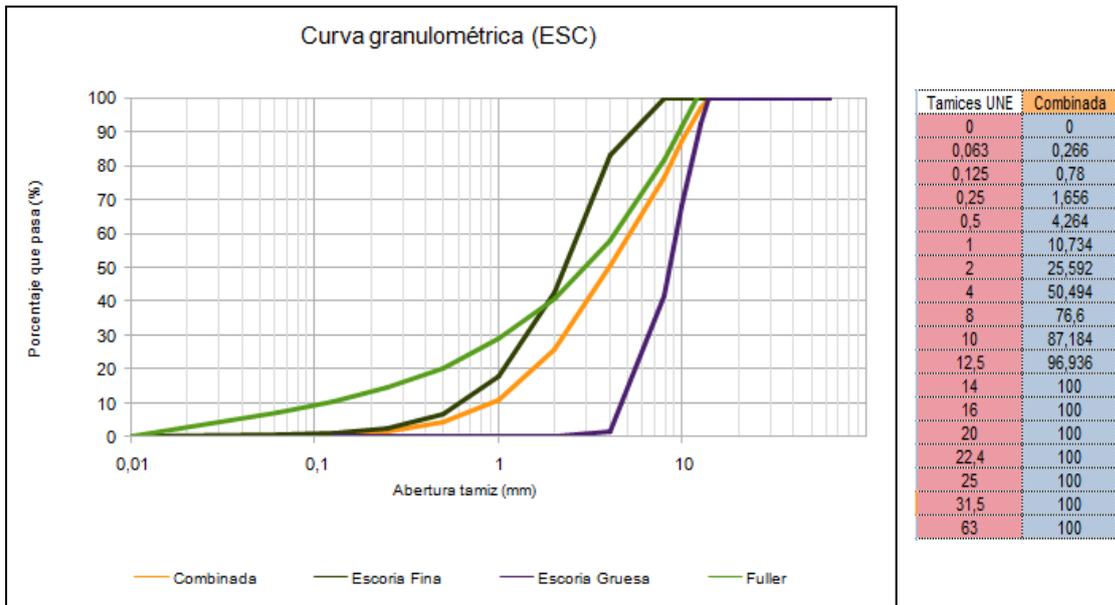


Imagen 42: Análisis granulométrico con 60% de arena y 40% de grava (escoria).

Finalmente las dosificaciones se especificaron para 1m³ y posteriormente se empleó un volumen de amasado de 6m³, tal y como se puede observar en las Tablas 12, 13 y 14:

DOSIFICACIÓN DE REFERENCIA					
Fecha: 21/06/2022					
MATERIAL	CEMENTO	ARENA	GRAVA	AGUA	S.P.
DOSIFICACIÓN	250 kg/m ³	913,5 kg/m ³	1116,5 kg/m ³	160 l/m ³	3,75 l/m ³
PESO/VOLUMEN DE AMASADO	1,5 kg	5,48 kg	6,7 kg	0,96 l	0,0225 l

Tabla 12: Dosificación original de referencia.

DOSIFICACIÓN CON RCD					
Fecha: 21/06/2022					
MATERIAL	CEMENTO	ARENA	GRAVA	AGUA	S.P.
DOSIFICACIÓN	250 kg/m ³	1116,5 kg/m ³	913,5 kg/m ³	160 l/m ³	3,75 l/m ³
PESO/VOLUMEN DE AMASADO	1,5 kg	6,7 kg	5,48 kg	0,96 l	0,0225 l

Tabla 13: Dosificación original con RCD.

DOSIFICACIÓN CON ESCORIAS					
Fecha: 21/06/2022					
MATERIAL	CEMENTO	ARENA	GRAVA	AGUA	S.P.
DOSIFICACIÓN	250 kg/m ³	913,5 kg/m ³	1116,5 kg/m ³	160 l/m ³	3,75 l/m ³
PESO/VOLUMEN DE AMASADO	1,5 kg	5,48 kg	6,7 kg	0,96 l	0,0225 l

Tabla 14: Dosificación original con escorias.

4.4.2 Procedimiento de amasadas

Una vez mencionados los materiales y equipos a emplear, con las dosificaciones definidas, se explicará el procedimiento llevado a cabo para realizar las amasadas.

1. PESAJE DE MATERIALES.

Tal y como se ha explicado en las *Tablas 12, 13 y 14*, se empleó la cantidad correspondiente a través de una báscula con la ayuda de unos recipientes.

2. AMASADO DEL HORMIGÓN.

Tras el pesaje de los diferentes materiales, se procedió a realizar la amasada siguiendo los siguientes pasos:

- Primero se añadió la grava y la arena a la hormigonera, hasta obtener una mezcla homogénea.
- Posteriormente, se agregó el cemento, mezclándolo con los áridos.
- Tras la mezcla de los materiales, se vertieron dos tercios del agua total, que fue amasada durante un tiempo determinado.
- Finalmente se echó el resto del agua junto al superplastificante (que había sido mezclado previamente) y se amasó hasta obtener la mezcla final.

3. MEDICIÓN DE LA CONSISTENCIA (CONO DE ABRAMS).

Tras realizar la amasada y previo a la introducción en los moldes, se procedió a efectuar la medición de la consistencia a través del asentamiento obtenido del cono de Abrams. La prueba consistió en rellenar el cono de Abrams, que se realizó en tres tongadas y se apisonaron con 25 golpes de varilla, retirando el molde al finalizar para medir el asentamiento que experimentó la masa de hormigón colocada en el interior.

4. INTRODUCCIÓN EN MOLDES.

Una vez hecha la medición, se procedió a introducir la mezcla en los moldes, que previamente se cubrió con desencofrante para que al desmoldar las probetas no se pegaran a las esquinas y facilitara su extracción. Cabe mencionar que los moldes se rellenaron hasta la mitad y se vibraron, y que posteriormente se rellenaron completamente y se volvieron a vibrar.

5. CURADO DE LAS PROBETAS

Tras preparar las probetas, se dejaron en los moldes durante 24 horas en un ambiente húmedo. Tras ese periodo, se desmoldaron, se enumeraron y se introdujeron en un tanque de agua, permaneciendo durante 28 días para continuar con el proceso de curado.

A continuación se muestra el esquema del proceso de las amasadas:



Imagen 43: Esquema del proceso de las amasadas.

4.4.3 Correcciones in situ

El amasado se realizó de la misma manera para los tres casos, sin embargo, durante el proceso se identificaron una serie de problemas en las amasadas de RCD y escorias. Al mezclar la grava, la arena y el cemento con el agua y el superplastificante se generaron unas bolas, por lo que se decidió modificar la dosificación.



Imagen 44: Las bolas generadas durante el proceso de amasado con RCD.

En primer lugar, se aumentó la cantidad del superplastificante de 1,5% a 2%, añadiendo 11 ml de agua para la disolución correcta del aditivo. Tras esta modificación, la dosificación dejaría de cumplir ligeramente la relación agua/cemento que establecía la normativa.

CEMENTO	ARENA	GRAVA (RCD)	AGUA	S.P.
-	-	-	162 l/m ³	5 l/m ³
-	-	-	11 ml	7 ml

Tabla 15: Primera modificación de la dosificación con RCD, realizado durante el amasado.

Al continuar con el mismo problema, se decidió recalcular la dosificación. Se aumentó la cantidad de cemento en +25 kg/m³, y por lo tanto se añadió más cantidad de agua hasta alcanzar el valor máximo permitido por la normativa, con el objetivo de obtener mayor trabajabilidad. Además, se incrementó la dosificación del superplastificante del 2% al 2,5%.

	CEMENTO	ARENA	GRAVA	AGUA	S.P.
MODIFICACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN	+25 kg/m ³	-	-	+16 l/m ³	6,875 l/m ³
MODIFICACIÓN DEL PESO/VOLUMEN	150 gr	-	-	+97,5 ml (11 ya añadidos anteriormente)	41,25 ml (29,5 ya añadidos anteriormente)

Tabla 16: Segunda modificación de la dosificación con RCD, realizado durante el amasado

Finalmente, la dosificación quedó de la siguiente manera:

	CEMENTO	ARENA	GRAVA	AGUA	S.P.
DOSIFICACIÓN INICIAL	250 kg/m ³	1116,5 kg/m ³	913,5 kg/m ³	160 l/m ³	3,75 l/m ³
DOSIFICACIÓN FINAL	275 kg/m ³	1116,5 kg/m ³	913,5 kg/m ³	176 l/m ³	6,875 l/m ³
PESO/VOLUMEN FINAL	1,65 kg	6,7 kg	5,48 kg	1,056 l	41,25 ml

Tabla 17: Dosificación final con RCD.

ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE HORMIGONES CON SUBSTITUCIÓN TOTAL DE ÁRIDO GRUESO POR SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES (ESCORIA DE ACERÍA) Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

Las modificaciones mencionadas se realizaron tanto para las amasadas de RCD como de escoria puesto que ambas presentaron los mismos problemas de amasado.

Sin embargo, se decidió modificar estas dosificaciones finales y volver a realizar otras dos amasadas (una de RCD y otra de escorias) debido a que se preveía lograr unas resistencias bajas, además de observar la segregación de la lechada en la amasada de escorias.



Imagen 45: Probetas moldeadas y desmoldadas (referencia a la probeta N°4 de escoria).

4.4.4 Nuevas dosificaciones

Como ya se ha comentado en el apartado 4.4.3 *Correcciones in situ*, se decidió realizar nuevas dosificaciones de RCD y escorias, introduciendo arena de sílice y aumentando la cantidad de superplastificante al 2%. A continuación, se muestran las dosificaciones nuevas:

DOSIFICACIÓN CON RCD						
Fecha: 22/06/2022						
MATERIAL	CEMENTO	ARENA (55%)		GRAVA	AGUA	S.P.
		Sílice (10%)	Caliza (45%)			
DOSIFICACIÓN INICIAL	250 kg/m ³	-	1116,5 kg/m ³	913,5 kg/m ³	160 l/m ³	3,75 l/m ³
DOSIFICACIÓN FINAL	250 kg/m ³	203,3 kg/m ³	915,53 kg/m ³	913,5 kg/m ³	160 l/m ³	5 l/m ³
PESO/VOLUMEN	1,5 kg	1,22 kg	5,48 kg	5,48 kg	0,96 l	0,03 l

Tabla 18: Dosificación con RCD modificada tras introducir un nuevo material (arena de sílice).

DOSIFICACIÓN CON ESCORIAS						
Fecha: 22/06/2022						
MATERIAL	CEMENTO	ARENA (60%)		GRAVA	AGUA	S.P.
		Sílice (28%)	Escoria (32%)			
DOSIFICACIÓN INICIAL	250 kg/m ³	-	1500 kg/m ³	1000 kg/m ³	160 l/m ³	3,75 l/m ³
DOSIFICACIÓN FINAL	250 kg/m ³	625 kg/m ³	700 kg/m ³	925 kg/m ³	160 l/m ³	5 l/m ³
PESO/VOLUMEN	1,5 kg	3,75 kg	4,2 kg	5,5 kg	0,96 l	0,03 l
*Para este caso se tomó como referencia una densidad de 3.000 kg/m ³ para la escoria.						

Tabla 19: Dosificación con escorias modificada tras introducir un nuevo material (arena de sílice).

Se realizó el mismo proceso de amasado que se llevo a cabo para las tres amasadas anteriores, con la diferencia del añadido de la arena de sílice, obteniendo unas probetas mejores.

5. ENSAYOS Y RESULTADOS

En este apartado se explicará el procedimiento de los diferentes ensayos realizados y posteriormente se analizarán los resultados obtenidos.

5.1 Ensayos

5.1.1 Cono de Abrams

Para medir la consistencia del hormigón se empleará la norma *UNE-EN 12350-2:2006 Ensayos del hormigón fresco. Parte 2: Ensayos de asentamiento* mediante el cono de Abrams.

El ensayo del cono de Abrams se basa en la disminución que experimenta un tronco con forma de cono de hormigón fresco. El ensayo se realizó según lo establecido por la normativa:

- Se colocó el molde metálico sobre una chapa rígida, sujetándose con los pies firmemente para evitar movimientos indeseados durante el llenado del molde.
- Seguidamente se relleno el molde con hormigón fresco distribuidas en 3 capas, ocupando cada una de ellas un tercio de la altura del molde.
- Una vez colocada cada capa de hormigón fresco, se procedió a la compactación mediante 25 golpes con una barra metálica, procurando que la barra penetrara hasta la capa inferior y rellenara todos los huecos. Para la última capa se vertió hormigón hasta rebosar.
- Una vez finalizado el compactado, se retiró el molde en dirección vertical y de manera uniforme, evitando movimientos laterales que pudieran afectar al hormigón.
- El resultado de la consistencia se determinó midiendo la distancia entre la altura del molde y el punto más alto de la muestra.
- Un aspecto a tener en cuenta es que el ensayo solamente es válido si se produce un correcto asentamiento de la masa, donde el hormigón permanece intacto y con una forma simétrica. Por lo tanto, el ensayo no resulta válido si se produce un desparramamiento o asentamiento sesgado.

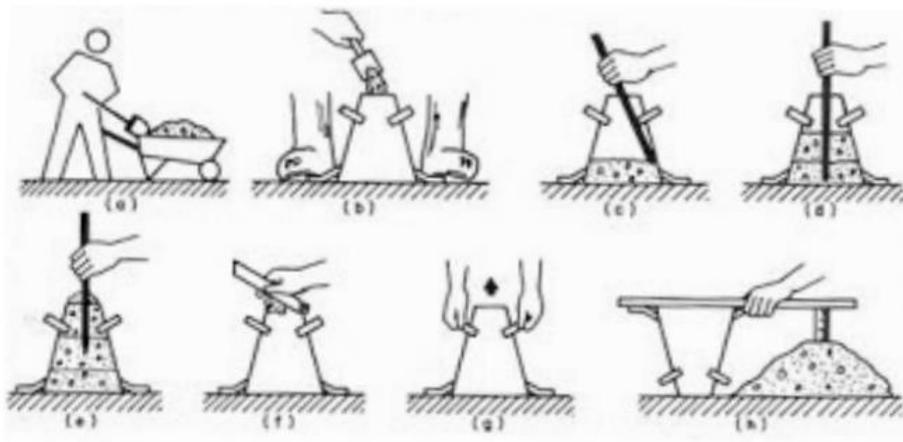


Imagen 46: Proceso de realización del Cono de Abrams.

Según establece el artículo 33.5 *Docilidad del Hormigón* del Código Estructural, se asignarán diferentes clases de consistencia de acuerdo con el resultado obtenido en el ensayo de asentamiento:

Tipo de consistencia	Asentamiento en mm
Seca (S)	0-20
Plástica (P)	30-40
Blanda (B)	50-90
Fluida (F)	100-150
Líquida (L)	160-210

Tabla 20: Clases de consistencia según lo establecido por el Código Estructural [32].

5.1.2 Determinación de la densidad y la porosidad

La porosidad es una de las características que más influyen en la resistencia y durabilidad del hormigón, por lo que se decidió realizar los ensayos pertinentes para definirla. A continuación se explica el proceso que se llevó a cabo:

- Tras desmoldar las probetas, se procedió a sumergirlas en un tanque de agua para continuar con el proceso de curado durante 28 días, y así evitar pérdidas de humedad.
- Una vez transcurrido ese tiempo, se pesaron las probetas saturadas.
- Seguidamente se introdujeron en el horno a 105°C durante 54 horas, para lograr la evaporación total del agua.
- Finalmente, se volvieron a pesar las probetas.



Imagen 47: Probeta N°5 de escoria.

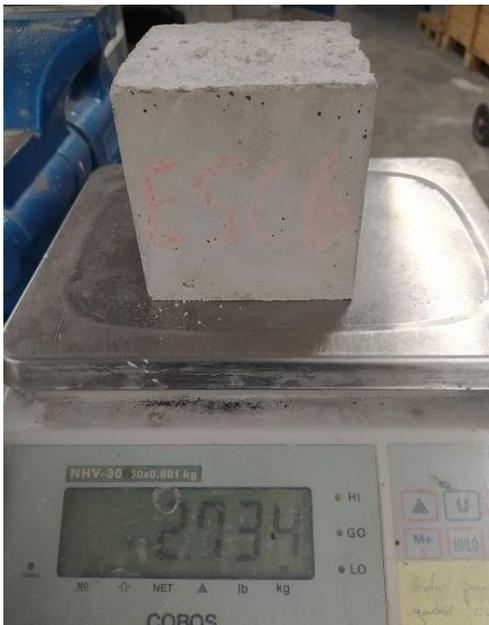


Imagen 48: Pesaje de la probeta EAF6 e imagen del horno.

5.1.3 Ensayo de doble punzonamiento

Tras determinar la densidad de las probetas, se procedió a calcular las características mecánicas del hormigón mediante el ensayo de doble punzonamiento, también conocido como Ensayo de Barcelona.

Se trata de un ensayo diseñado para determinar la resistencia a tracción indirecta del hormigón, en el que se emplean probetas, tanto cilíndricas como cúbicas, sometidas a una carga de compresión uniaxial mediante dos punzones circulares de acero dispuestos concéntricamente encima y debajo de la muestra [33].

Al realizar el ensayo, la carga aplicada produce un incremento de la tracción sobre los planos que contienen el eje del cilindro, fracturándose a lo largo de estos planos. Por lo general, suelen generarse tres fisuras, además de formarse dos cuñas cónicas bajo los punzones de acero.



Imagen 49: Ensayo de doble punzonamiento.

Empleando el principio de bielas y tirantes, se calculará la resistencia a tracción indirecta (f_{ct}) y se relacionará con la resistencia a compresión (f_{ck}) a través de las siguientes expresiones:

$$f_{ct} = \frac{P}{9 * \pi * h * a}$$

$$f_{ck} = 0,30 * f_{ct}^{2/3}$$

De manera que “ P ” corresponde a la carga máxima aplicada (carga de rotura), “ h ” la mitad de la altura de la probeta (50 mm) y “ a ” al radio de la pieza intermedia que sirve para aplicar la carga de manera localizada.

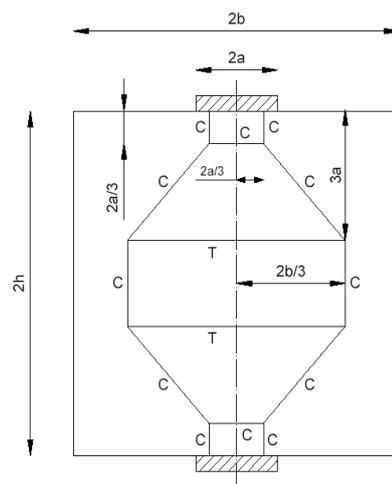


Imagen 50: Modelo de Bielas y Tirantes para el ensayo de doble punzonamiento o ensayo de Barcelona.

5.2 Resultados

Antes de analizar los resultados, se facilitará la información de las fechas de amasado, desmoldeo de las probetas y la duración de secado.

Amasada	Probetas cúbicas	Fecha Amasado	Fecha Desmoldeo	Fecha inicio secado	Fecha Ensayo Teórica	Fecha Ensayo Real
REF	REF1	21/06/2022	22/06/2022	18/07/2022 (10:00)	20/07/2022 (10:00)	20/07/2022 (16:00)
	REF2					
	REF3					
	REF4					
RCD ₁	RCD1	21/06/2022	22/06/2022	18/07/2022 (10:00)	20/07/2022 (10:00)	20/07/2022 (16:00)
	RCD2					
	RCD3					
	RCD4					
EAF ₁	EAF1	21/06/2022	22/06/2022	18/07/2022 (10:00)	20/07/2022 (10:00)	20/07/2022 (16:00)
	EAF2					
	EAF3					
	EAF4					
RCD ₂	RCD5	22/06/2022	24/06/2022	18/07/2022 (10:00)	21/07/2022 (10:00)	20/07/2022 (16:00)
	RCD6					
	RCD7					
	RCD8					
EAF ₂	EAF5	22/06/2022	24/06/2022	18/07/2022 (10:00)	21/07/2022 (10:00)	20/07/2022 (16:00)
	EAF6					
	EAF7					
	EAF8					

Tabla 21: Fechas relevantes del ensayo.

5.2.1 Consistencia del hormigón

A continuación, se muestran los resultados de consistencia de cada amasada:

AMASADA	FECHA	CONSISTENCIA
REFERENCIA (1)	21/06/2022	0 cm
RCD₁ (2)	21/06/2022	0 cm
ESCORIA₁ (3)	21/06/2022	Desparramamiento
RCD₂ (4)	22/06/2022	0 cm
ESCORIA₂ (5)	22/06/2022	5 cm

Tabla 22: Consistencias obtenidas tras realizar el ensayo del Cono de Abrams.

Como se puede observar en la *Tabla 22*, las consistencias obtenidas en los casos de Referencia, RCD₁ y RCD₂ han sido de 0 cm, por lo que se obtiene una clase Seca (según lo establecido por la normativa). En el caso de escorias, la primera amasada sufrió un desparramamiento del cono, y por consiguiente, el ensayo no fue válido. En cambio, la segunda amasada resultó satisfactoria, obteniendo mayor trabajabilidad con un cono de 5 cm y una clase Blanda. Esta mejora de la consistencia puede darse tras añadir arena de sílice, puesto que se trata de una arena más fina que la arena caliza. Sin embargo, esta mejora no se ve reflejada en la amasada

de RCD, puesto que la cantidad de arena de sílice es menor. Por lo tanto, se puede deducir que la mejora de la consistencia se basa en la cantidad de finos empleada.



Imagen 51: Representación del cono de Abrams realizado para cada amasada.

5.2.2 Densidad y porosidad

Tras el pesaje de cada probeta, se procedió a calcular la densidad y porosidad, en base a los datos del peso sumergido, el peso saturado y el peso seco.

Tras consultar la *Tabla 23* y partiendo de la base de las muestras de referencia, se puede deducir que las muestras de Residuos de Construcción y Demolición presentan un 2,08% menor de densidad, mientras que las muestras de escorias presentan un 24,5% mayor. Cabe mencionar que se aprecia un ligero incremento de la densidad en las probetas de RCD realizadas el día 22 de junio, mientras que las de escorias presentan un descenso en la densidad. Estas variaciones vienen dadas por la modificación de la dosificación, obteniendo unos valores de 1,3% respecto a los RCD y 20,2% respecto a las escorias, es decir, tras la modificación de la dosificación la comparativa de densidades entre las muestras de RCD-Referencia y Escorias-Referencia disminuye.

La porosidad se relaciona directamente con la densidad de un material, que es la encargada de definir la cantidad de vacíos. Por lo tanto, cuanto mayor es la densidad, menor es la cantidad de huecos, y por consiguiente, menor porosidad presentará.

Analizando los datos calculados y partiendo de la base de las muestras de referencia, se puede deducir que las muestras de Residuos de Construcción y Demolición presentan un 4,7% mayor de porosidad, mientras que las muestras de Escorias presentan un 12,4% menor. Sin embargo, estas diferencias varían para las muestras de RCD y Escorias realizadas el día 22 de junio, obteniendo unos valores de 0,7% y 23,5%, respectivamente. Tras la modificación de la dosificación, se puede deducir que la porosidad disminuye tanto para el caso de RCD como para el caso de escorias, obteniendo unos valores próximos a las muestras de referencia.

ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE HORMIGONES CON SUBSTITUCIÓN TOTAL DE ÁRIDO GRUESO POR SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES (ESCORIA DE ACERÍA) Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

Como ya se ha comentado, cuanto mayor es la densidad de una muestra, menor será la porosidad que presente. Partiendo de la base de las muestras de referencia, las probetas de RCD presentan mayor porosidad, y por consiguiente, se obtienen unas probetas de menor densidad, puesto que contiene una estructura con más huecos. Para el caso de las muestras de escorias ocurre inversamente lo mismo, presentan menor porosidad y mayor densidad, puesto que contienen elementos con mayor peso específico.

Tal y como se ha comentado en el apartado 3.2.3 *Porosidad*, la densidad y la porosidad son proporcionales, mientras que uno aumenta el otro disminuye. Tras analizar los resultados, se puede concluir que las muestras de RCD presentan mayor porosidad y menor densidad, mientras que las muestras de escorias presentan menor porosidad y mayor densidad respecto a las muestras de Referencia.



Imagen 52: Probetas desmoldadas.

En la *Tabla 23* se pueden observar los datos recogidos en el laboratorio y los cálculos realizados para la obtención de la densidad y porosidad de las diferentes muestras.

ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE HORMIGONES CON SUBSTITUCIÓN TOTAL DE ÁRIDO GRUESO POR SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES (ESCORIA DE ACERÍA) Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

Probetas cúbicas	Peso Saturado (gr.)	Peso Sumergido (gr.)	Peso seco (gr.)	Porosidad (%)	Porosidad (%) media	Coefficiente Variación (%)	Densidad (kg/m ³)	Densidad aparente (kg/m ³) media	Coefficiente Variación (%)
REF1	2416	1005	2253	%11,55	0,11	%1,40	2241,79	2246,65	% 0,21
REF2	2429	1011	2268	%11,35					
REF3	2416	1003	2258	%11,18					
REF4	2474	1027	2311	%11,26					
RCD1	2414	1023	2252	%11,65	0,12	%2,42	2201,37	2199,86	% 0,44
RCD2	2347	997	2182	%12,22					
RCD3	2415	1023	2248	%12,00					
RCD4	2438	1028	2274	%11,63					
EAF1	2716	895	2542	%9,56	0,10	%5,26	2840,22	2796,15	% 1,21
EAF2	2716	911	2529	%10,36					
EAF3	2444	817	2291	%9,40					
EAF4	2568	865	2391	%10,39					
RCD5	2398	1011	2244	%11,10	0,11	%2,54	2219,58	2216,82	% 0,19
RCD6	2376	1002	2216	%11,64					
RCD7	2376	1002	2225	%10,99					
RCD8	2408	1016	2251	%11,28					
EAF5	2865	1014	2703	%8,75	0,09	%2,61	2665,68	2700,72	% 1,39
EAF6	2902	1023	2734	%8,94					
EAF7	2919	1012	2755	%8,60					
EAF8	2940	1013	2778	%8,41					

Tabla 23: Datos sobre el pesaje de las probetas, y cálculos de densidad.

5.2.3 Resistencia mecánica

Una vez obtenida la densidad de las probetas, se procede a la realización del ensayo de doble punzonamiento, que tras realizar los cálculos correspondientes se determinará la resistencia a compresión.

Partiendo de la base de las muestras de Referencia, con una resistencia media a compresión de 15,95 MPa, se puede deducir que las muestras de RCD realizadas el día 21 de junio presentan un 84,6% más de resistencia a compresión, en cambio, las muestras de Escorias presentan un 54,9% menos, puesto que la amasada no se realizó correctamente. Para las muestras realizadas el día 22 de junio, se puede observar que la resistencia de las muestras de RCD presentan una ligera disminución, mientras que las muestras de escorias presentan un aumento considerable, situándose en 33,63 Mpa de resistencia a compresión, es decir, un 110,7% más que las muestras de Referencia.

A pesar de que la resistencia a tracción no es un punto fuerte del hormigón, se procede al análisis. Partiendo de la base de las muestras de Referencia, con una resistencia media de 1,90 MPa, se puede deducir que las muestras de RCD presentan un 51% más de resistencia, y las de Escorias un 64,2% más, obteniendo unos valores medios de 2,87 Mpa y 3,12 Mpa.

Tras analizar las resistencias a tracción y compresión, se puede concluir que las probetas que mejores prestaciones mecánicas presentan son las realizadas con Escorias, del día 22 de junio, con unas resistencias máximas a tracción de 3,30 Mpa y compresión de 36,45 Mpa.

A continuación se puede observar en la *Imagen 44* las probetas una vez realizado el ensayo de doble punzonamiento, mientras que en la *Tabla 24* se recogen los datos obtenidos durante el mismo. Además, en el *Gráfico 10* se puede observar información complementaria del ensayo, recopilando los datos más relevantes de las muestras más óptimas de cada amasada.



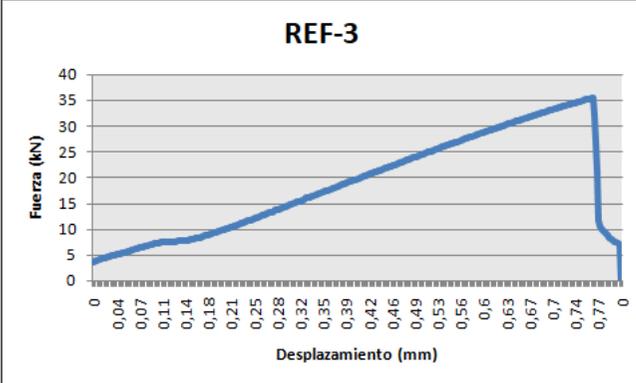
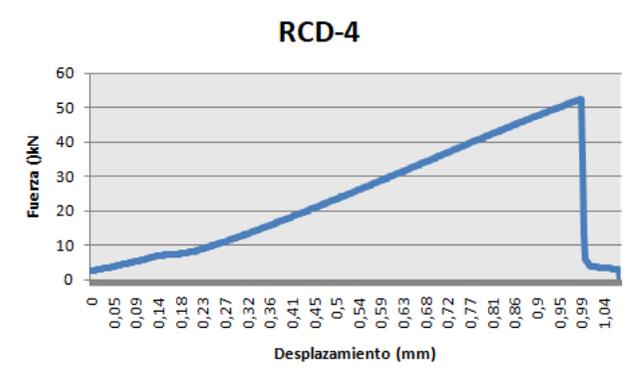
Imagen 53: Probetas tras realizar el ensayo de doble punzonamiento.

ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE HORMIGONES CON SUBSTITUCIÓN TOTAL DE ÁRIDO GRUESO POR SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES (ESCORIA DE ACERÍA) Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

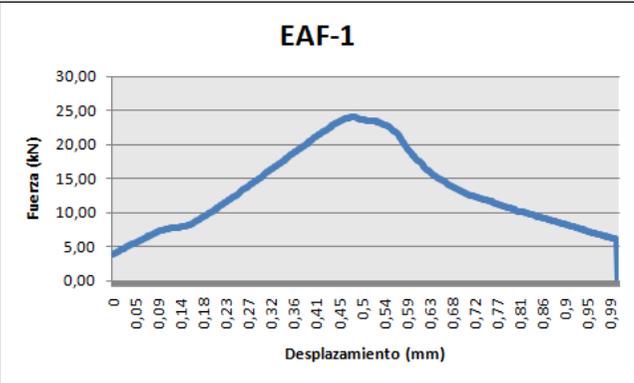
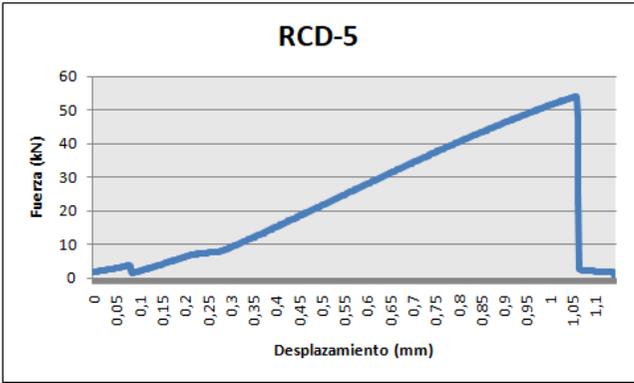
Probetas cúbicas	Carga Rotura (KN)	Resistencia tracción indirecta, fct (Mpa)	Resistencia fct,m (Mpa) media	Coefficiente de Variación (%)	Resistencia compresión, fc (Mpa)	Resistencia fcm (Mpa) media	Coefficiente de Variación (%)
REF1	34,53	1,95	1,90	%4,91	16,62	15,96	%7,36
REF2	32,41	1,83			15,12		
REF3	35,42	2,00			17,27		
REF4	32,16	1,81			14,83		
RCD1	52,28	2,96	2,86	%4,30	30,97	29,47	%6,43
RCD2	48,14	2,72			27,36		
RCD3	49,32	2,79			28,38		
RCD4	52,51	2,97			31,17		
EAF1	23,27	1,32	1,10	%24,93	9,20	7,19	%34,58
EAF2	20,78	1,18			7,76		
EAF3	12,38	0,70			3,57		
EAF4	21,6	1,22			8,22		
RCD5	53,79	3,04	2,87	%6,41	32,32	29,63	%9,51
RCD6	51,47	2,91			30,25		
RCD7	51,5	2,91			30,28		
RCD8	46,12	2,61			25,66		
EAF5	52,88	2,99	3,12	%4,62	31,50	33,63	%6,94
EAF6	53,36	3,02			31,93		
EAF7	56,32	3,19			34,63		
EAF8	58,28	3,30			36,45		

Tabla 24: Datos sobre la resistencia mecánica de las diferentes probetas, tanto a tracción como a compresión.

ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE HORMIGONES CON SUBSTITUCIÓN TOTAL DE ÁRIDO GRUESO POR SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES (ESCORIA DE ACERÍA) Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

Nº AMASADA	DOSIFICACIÓN	Nº PROBETA	DIAGRAMA DEFORMACIÓN-TENSIÓN	IMAGEN						
1	Referencia	REF-3	<p style="text-align: center;">REF-3</p>  <table border="1" data-bbox="920 730 1556 790"> <thead> <tr> <th>Fuerza (kN)</th> <th>Desplazamiento (mm)</th> <th>Tiempo (s)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>35,42</td> <td>0,77</td> <td>91,5</td> </tr> </tbody> </table>	Fuerza (kN)	Desplazamiento (mm)	Tiempo (s)	35,42	0,77	91,5	
Fuerza (kN)	Desplazamiento (mm)	Tiempo (s)								
35,42	0,77	91,5								
2	RCD ₁	RCD-4	<p style="text-align: center;">RCD-4</p>  <table border="1" data-bbox="920 1220 1556 1279"> <thead> <tr> <th>Fuerza (kN)</th> <th>Desplazamiento (mm)</th> <th>Tiempo (s)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>52,51</td> <td>0,99</td> <td>119,1</td> </tr> </tbody> </table>	Fuerza (kN)	Desplazamiento (mm)	Tiempo (s)	52,51	0,99	119,1	
Fuerza (kN)	Desplazamiento (mm)	Tiempo (s)								
52,51	0,99	119,1								

ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE HORMIGONES CON SUBSTITUCIÓN TOTAL DE ÁRIDO GRUESO POR SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES (ESCORIA DE ACERÍA) Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

Nº AMASADA	DOSIFICACIÓN	Nº PROBETA	DIAGRAMA DEFORMACIÓN-TENSIÓN	IMAGEN						
3	ESC ₁	EAF-1	<p style="text-align: center;">EAF-1</p>  <table border="1" data-bbox="922 722 1556 778"> <thead> <tr> <th>Fuerza (kN)</th> <th>Desplazamiento (mm)</th> <th>Tiempo (s)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>23,27</td> <td>0,53</td> <td>63,3</td> </tr> </tbody> </table>	Fuerza (kN)	Desplazamiento (mm)	Tiempo (s)	23,27	0,53	63,3	
Fuerza (kN)	Desplazamiento (mm)	Tiempo (s)								
23,27	0,53	63,3								
4	RCD ₂	RCD-5	<p style="text-align: center;">RCD-5</p>  <table border="1" data-bbox="922 1208 1556 1264"> <thead> <tr> <th>Fuerza (kN)</th> <th>Desplazamiento (mm)</th> <th>Tiempo (s)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>53,79</td> <td>1,06</td> <td>127,2</td> </tr> </tbody> </table>	Fuerza (kN)	Desplazamiento (mm)	Tiempo (s)	53,79	1,06	127,2	
Fuerza (kN)	Desplazamiento (mm)	Tiempo (s)								
53,79	1,06	127,2								

ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE HORMIGONES CON SUBSTITUCIÓN TOTAL DE ÁRIDO GRUESO POR SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES (ESCORIA DE ACERÍA) Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

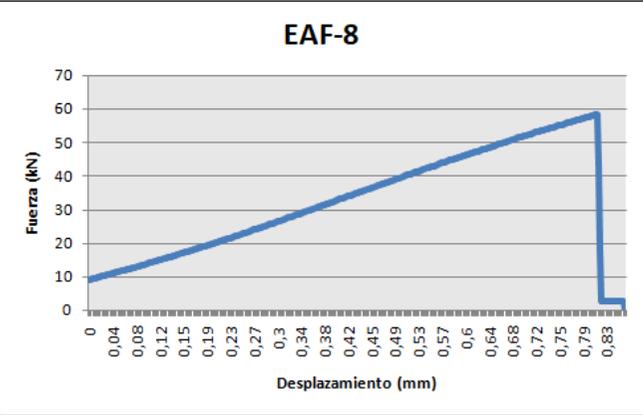
Nº AMASADA	DOSIFICACIÓN	Nº PROBETA	DIAGRAMA DEFORMACIÓN-TENSIÓN	IMAGEN						
5	ESC ₂	EAF-8	<p style="text-align: center;">EAF-8</p>  <table border="1" data-bbox="920 759 1563 815"> <thead> <tr> <th>Fuerza (kN)</th> <th>Desplazamiento (mm)</th> <th>Tiempo (s)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>58,28</td> <td>0,81</td> <td>97,2</td> </tr> </tbody> </table>	Fuerza (kN)	Desplazamiento (mm)	Tiempo (s)	58,28	0,81	97,2	
Fuerza (kN)	Desplazamiento (mm)	Tiempo (s)								
58,28	0,81	97,2								

Imagen 54: Recopilación de las probetas con los mejores resultados de cada amasada, junto al gráfico y la imagen de la misma.

6. CONCLUSIONES

El objetivo del estudio ha sido estudiar el comportamiento y las características de los diferentes hormigones planteados, que tras analizar los resultados obtenidos de los ensayos se concluye lo siguiente:

- Las consistencias de los hormigones con las dosificaciones planteadas son de clase seca, salvo la segunda amasada de escoria (clase blanda). Esto se debe a que se ha empleado poca cantidad de finos para los tres tipos de amasadas, lo cual hace que se obtengan hormigones menos fluidos, y por consiguiente, menos trabajables.
- Considerando que son hormigones con poca trabajabilidad, la segunda amasada de escorias presenta mejores prestaciones que las demás. Esto es debido al empleo de la arena de sílice, puesto que contiene una granulometría más fina que la arena caliza. Sin embargo, esta alteración no es apreciable en la segunda amasada de RCD, puesto que la cantidad empleada de arena de sílice es menor, por lo tanto, se puede concluir que las amasadas presentan mejor trabajabilidad con mayor cantidad de finos. Además, el aumento de la cantidad de superplastificante no se ha visto reflejado, puesto que se ha obtenido la misma consistencia para los dos casos de RCD.
- Visto que con la dosificación planteada para el hormigón convencional se obtenían hormigones secos, era de esperar que el hormigón realizado con áridos reciclados iba a tener una consistencia más seca, lo cual puede ser una de las razones por la que se generaron una especie de bolas durante el amasado.
- En cuanto a la densidad y porosidad de las diferentes muestras, se puede concluir que las probetas realizadas con Residuos de Construcción y Demolición son las que mayor porosidad presentan, obteniendo las densidades más bajas del ensayo, mientras que las muestras de escorias son las que menor porosidad presentan, y por lo tanto, al contener una estructura más compacta y con menor cantidad de huecos se obtienen unas probetas con mayor densidad.
- Según el estudio “Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete” [34], los hormigones con áridos reciclados absorben un 25% más de agua que el hormigón convencional (muestras de referencia). Esa capacidad de absorción de agua afecta a la relación de agua/cemento, ya que este tipo de hormigones requiere más cantidad de agua para lograr mayor trabajabilidad. Esta puede ser otra de las razones por las que se hicieron modificaciones sobre la dosificación durante el amasado, puesto que se buscaba paliar con los problemas que se generaban con la pasta de cemento.
- Tal y como cita el estudio “Behavior of steel slag aggregate in mortar and concrete - A comprehensive overview” [35], el 95% de los estudios confirman una mayor densidad con la incorporación de áridos de escorias, debido a su mayor peso específico respecto al árido natural, y que tras el ensayo se ha llegado a la misma conclusión. Cabe mencionar que el 70% de los estudios confirmaron una menor trabajabilidad respecto al hormigón convencional, debido a características como la porosidad, redondez del árido o absorción del agua.
- Analizando los resultados respecto al comportamiento mecánico, se puede concluir que las amasadas de RCD y Escorias presentan mayores prestaciones mecánicas que la amasada de referencia (convencional). Esto puede ser a que se modificaron las dosificaciones, con un ligero aumento de la cantidad de cemento.
- Citando el estudio “Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete” [34], los resultados obtenidos por varios autores mostró que la resistencia a la compresión del hormigón disminuye a

medida que aumenta la relación de árido reciclado. En el ensayo realizado se empleó una cantidad de 100% de árido reciclado, por lo tanto, se puede concluir que se habrían obtenido mayores prestaciones mecánicas con menor cantidad de árido reciclado.

- También se puede concluir que las amasadas que peores prestaciones mecánicas presentan son las que contienen mayor porosidad. Esto es debido a que los vacíos existentes en el hormigón facilitan la propagación de las fisuras, reduciendo considerablemente la resistencia del hormigón.
- Tal y como cita el estudio “Behavior of steel slag aggregate in mortar and concrete - A comprehensive overview” [35], la mayoría de estudios coinciden en que los áridos siderúrgicos, tanto finos como gruesos, aportan mayor resistencia al hormigón. En el estudio realizado se obtuvo un aumento de la resistencia respecto al hormigón convencional en torno al 100%.

Los ensayos realizados resultan satisfactorios en cuanto a resistencias, puesto que con una sustitución total del árido grueso de RCD y Escorias se han obtenido mayores prestaciones mecánicas que las obtenidas en la amasada de Referencia. Estas mejoras pueden verse afectadas por añadir mayor cantidad de cemento, aunque cabe destacar que los áridos empleados en la amasada de RCD (áridos reciclados) son de gran calidad, con poca cantidad de ladrillos y cuerpos extraños. Por esta misma razón, se puede concluir que es posible sustituir el 100% de los áridos gruesos por áridos reciclados (con estas mismas propiedades) y escoria negra de acería, aunque sería preciso continuar con otros estudios para analizar otras características y corroborar la sustitución del 100% del árido.

Tras comparar las dosificaciones de RCD y escorias, se puede observar que contienen prácticamente la misma cantidad de cemento y áridos, por lo tanto, se puede deducir que la diferencia que presentan dichas amasadas en cuanto a prestaciones mecánicas se basa en el tipo de árido empleado, es decir, la escoria negra de acería (áridos siderúrgicos) concede al hormigón mayores resistencias.

Queda fuera del estudio la durabilidad y trabajabilidad de los diferentes hormigones, por lo que debería continuarse con otros estudios para analizar dichas propiedades.

Aunque todavía existen algunas dudas sobre el comportamiento a flexión y cortante del hormigón con áridos reciclados y la integridad de los elementos estructurales a lo largo de su vida útil. Por ello, la mayoría de las normas y especificaciones a nivel mundial limitan el ratio de sustitución del árido reciclado a aproximadamente un 20% en elementos estructurales.

A pesar de la incertidumbre, el árido reciclado y el árido siderúrgico tienen un gran potencial medioambiental. Por lo tanto, para promover el ahorro de energía y la preservación del medio ambiente, es fundamental avanzar en los estudios sobre la viabilidad de utilizar porcentajes más altos de agregados reciclados y siderúrgicos en hormigones estructurales.

7. REFERENCIAS

- [1] Carbon emission of global construction sector – ScienceDirect. Lizhen Huang, Guri Krigsvoll, Fred Johansen, Yongping Liu, Xiaoling Zhang.
- [2] Futuro del hormigón. Global Cement and Concrete Association.
- [3] Una industria sostenible para una Europa sostenible – Anefa Revista anual 2021-2022.
- [4] Informe Anual 2021. ANEFHOP.
- [5] “El consumo de cemento arranca el año con un crecimiento del 21% en enero”. Revista CIC – Centro Informativo de la Construcción.
- [6] Anuario del sector cementero español del 2016. Oficemen – Agrupación de fabricantes de cemento de España.
- [7] Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete. Fernanda de Andrade Salgado, Fláviode Andrade Silva. A review – ScienceDirect.
- [8] “La producción mundial de acero crece un 3,7% en 2021 a pesar de baja en China”. Acermetal.
- [9] La producción de acero en España volvió a crecer en 2017. Artículo del ABC.
- [10] Historia del País Vasco. La industrialización <kondaira.net>
- [11] “Economía circular: definición, importancia y beneficios”. Noticias UE – Medio Ambiente.
- [12] “Towards the Circular Economy: Economic and business rationale for an accelerated transition”. Fundación Ellen MacArthur.
- [13] “Modificar nuestras pautas de producción y consumo: El nuevo Plan de acción para la economía circular muestra el camino hacia una economía competitiva y climáticamente neutra de consumidores empoderados”. Comisión Europea.
- [14] Artículo 33.6 *Tipificación de los Hormigones* del Código Estructural.
- [15] Cementos. Dosificación del hormigón. José-Tomás San-José Lombera (Apuntes de clase).
- [16] Componentes y propiedades del cemento. IECA – Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones.
- [17] Tabla Al.1.1a. Cementos comunes. Real Decreto 256/2016, de 10 de junio, por el que se aprueba la Instrucción para la recepción de cementos (RC-16).
- [18] Artículo 31.2 *Tipos de aditivos* del Código Estructural.
- [19] “Los residuos de la construcción: Clasificación y normativa”. Reciclaje Verde.

[20] Closed Cycle Construction: an integrated process for the separation and reuse of C&D waste. E. Mulder, T.P.R de Jong, L. Feenstra. A review – ScienceDirect.

[21] Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates. A. Akbarnezhad, K.C.G. Ong, M.H. Zhang, C.T. Tam, T.W.J. Foo. A review – ScienceDirect.

[22] Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. M.S. de Juan, P.A. Gutiérrez. A review – ScienceDirect.

[23] Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. M. Bravo, J. de Brito, J. Pontes, L. Evangelista. A review – ScienceDirect.

[24] Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. Z.H. Duan, C.S. Poon. A review – ScienceDirect.

[25] Guía de aplicación del decreto de actividades de valorización de escorias negras de fabricación de acero en horno de arco eléctrico y su utilización como árido siderúrgico. Departamento de medio ambiente, planificación territorial y vivienda. Gobierno Vasco.

[26] Áridos, granulometría. Dosificación del hormigón. José-Tomás San-José Lombera (Apuntes de clase).

[27] Tecnología del hormigón. Dosificación del hormigón. José-Tomás San-José Lombera (Apuntes de clase).

[28] Los 5 problemas que deben afrontar los contratistas del hormigón. Somero.

[29] Cementos Lemona. Cemento. Productos. Catálogo CEM II-B/L 32,5R.

[30] ArcelorMittal. Productos Planos. ArcelorMittal Sestao.

[31] Proceso de derrumbamiento de la chimenea de la Central Térmica de Anllares. Ana F. Barredo / EFE.

[32] Artículo 33.5 Docilidad del Hormigón. Código Estructural.

[33] Ensayo de doble punzonamiento aplicado al hormigón reforzado con fibras. Universidad Politécnica de Cataluña - UPC. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3323>

[34] Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete. Fernandade Andrade Salgado, Fláviode Andrade Silva – ScienceDirect.

[35] “Behavior of steel slag aggregate in mortar and concrete - A comprehensive overview”. Alaa M.Rashad – ScienceDirect.