Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

TRABAJO FINAL DE MASTER

Influencia de las sinergias de subproductos industriales para el desarrollo de un hormigón estructural

Trabajo realizado por:
Cindy Rossana Correa Reinoso

Dirigido por:

Ignacio, Segura Pérez

Byron, Londa Cañar

Master en:

Ingeniería Estructural y de la Construcción

Barcelona, mayo 2024

DEDICATORIA

A mi familia.

AGRADECIMIENTOS

Quiero empezar agradeciendo a Dios por haberme acompañado en todo el camino de mi master, por haberme dado perseverancia, paciencia y sabiduría para superar los momentos difíciles.

Agradezco a mis padres Reymberg e Ivonne, mis hermanos, Alex, Pamela y Miriam por su apoyo incondicional y ánimos brindados desde Ecuador.

A mis sobrinas, María Celeste y Gianna por ser mi mayor motivación.

A mis compañeros del master, que me acompañaron y guiaron en estos meses de arduo trabajo donde su buena predisposición y conocimientos me ayudaron con toda la campaña experimental, gracias Byron, Manuel e Iván M.

Al equipo técnico del Laboratorio de Tecnología de Materiales y Estructuras (LATEM) de la Escuela de Caminos de la UPC, que me manifestaron su apoyo y colaboración desde un principio para la elaboración de este trabajo final de master.

A mi enamorado Iván F, que me acompañó en los días de laboratorio, noches largas y momentos en los que quería desistir.

Gracias por creer en mí.

RESUMEN

Hoy en día el hormigón resulta un material de mucha utilidad gracias a que ayuda a edificar todo tipo de estructuras, avanza progresivamente con el tiempo y también ocupa uno de los primeros lugares de los materiales más usados a nivel mundial, no obstante, tiene sus desventajas debido a la gran contaminación que causa por el alto gas de efecto invernadero como CO2 que generan sus componentes al ser producidos y es por esto que se busca reducir al máximo este impacto medioambiental.

Este proyecto tiene como foco principal estudiar la influencia de sustituciones parcial y total de los componentes de la matriz de hormigón, en este caso, cemento y esqueleto granular por subproductos industriales como escoria de cobre, lodos de lavado, y áridos reciclados procedentes de hormigón por demolición, mediante caracterización de propiedades en estado freso y endurecido en base a una dosificacion de referencia proporcionada por la constructora Hormipresa.

La metodología de este trabajo se basó en el análisis de las tres confecciones realizadas: 2 con adiciones (escoria de cobre y lodos de lavado) sustituyendo en un 20% al cemento y 1 sustituyendo totalmente el esqueleto granular y que fueron ensayadas a edades de 1, 3, 7 y 28 días. Como se indicó, se basó en una dosificacion de referencia, misma que fue fabricada por distinto fabricante de cemento, este hormigón de referencia tiene características autocompactantes, con una resistencia característica de 50 MPa a los 28 días.

En general, las confecciones donde el cemento fue sustituido un 20% tuvo un mejor comportamiento con las características requeridas, para la propiedad de autocompactibilidad cumplió tanto para lo solicitado como para los rangos dictados por la norma. Además, para ambas confecciones resultó que la resistencia a compresión inicial fue menor que la de referencia con un 30% aproximadamente. Mientras que, a una edad de 28 días, la sustitución de escoria se comportó de manera similar a la de referencia, y los lodos de lavado bajo un 12%.

Por último, la confección con un esqueleto granular totalmente reciclado fue el escenario de peor comportamiento para todos los requerimientos prestacionales puesto que no cumplió con ninguna de ellas.

ABSTRACT

Nowadays concrete is a very useful material thanks to the fact that it helps to build all kinds of structures, it advances progressively over time and also occupies one of the first places of the most used materials worldwide, however, it has its disadvantages due to the pollution it causes due to the high greenhouse gas such as CO2 that its components generate when they are produced and that is why the aim is to reduce this environmental impact as much as possible.

The main focus of this project is to study the influence of partial and total substitutions of the components of the concrete matrix, in this case, cement and granular skeleton by industrial by-products such as copper slag, concrete sludge wastes, and recycled aggregates from concrete by demolition, through characterization of properties in a fresh and hardened state based on a reference dosage provided by the construction company Hormipresa.

The methodology of this project was based on the analysis of the three confections made: 2 with additions (copper slag and concrete sludge wastes) substituting 20% of cement and 1 totally replacing the granular skeleton and which were tested at ages of 1, 3, 7 and 28 days. As indicated, it was based on a reference dosage, which was manufactured by a different cement manufacturer, this reference concrete has self-compacting characteristics, with a characteristic strength of 50 MPa at 28 days.

In general, the confections where the cement was replaced by 20% had a better performance with the required characteristics, for the property of self-compactness it complied both for what was requested and for the ranges dictated by the standard. In addition, for both confections, it turned out that the initial compressive strength was lower than the reference one, by approximately 30%. Whereas, at an age of 28 days, slag substitution behaved similarly to the baseline, and washing sludge down by 12%.

Finally, the confection with a fully recycled granular skeleton was the worst-performing scenario for all performance requirements since it did not comply with any of them.

RESUM

Actualment, el formigó és un material de molta utilitat perquè es fa servir per edificar tota classe d'estructures, avança progressivament amb el temps i també ocupa un dels primers llocs entre els materials més usats mundialment. No obstant això, el formigó té els seus desavantatges a causa de la gran contaminació ocasionada pels gasos d'efecte d'hivernacle com CO2 que generen els seus components durant la seva producció. Per això, es busca reduir al màxim aquest impacte mediambiental.

L'objectiu principal del projecte és estudiar la influència de substitucions parcial i total dels components de la matriu de formigó, en aquest cas, ciment i esquelet granular per subproductes industrials com a escòria de coure, llots de rentatge, i àrids reciclats procedents de formigó per enderrocament, mitjançant caracterització de propietats en estat fresc i endurit a partir de la dosificació de referència proporcionada per la constructora Hormipresa.

La metodologia d'aquest projecte es va basar en l'anàlisi de tres provetes cilíndriques de formigó: 2 amb addicions (escòria de coure i llots de rentatge) substituint en un 20% al ciment i 1 substituint totalment l'esquelet granular i que van ser assajades als 1, 3, 7 i 28 dies. Com es va indicar, s'ha fet tenint en compte la dosificació de referència, que va ser fabricada per altra fabricadora de ciment. Aquest formigó de referència té característiques autocompactants, amb una resistència de 50 MPa després de 28 dies.

En general, els assaigs on el ciment va ser substituït un 20% va presentar un millor comportament amb les característiques requerides, específicament, va complir amb la propietat d'autocompatibilitat esperada i també amb els rangs especificats per la normativa. A més a més, per ambdós assaigs va resultar que la resistència a compressió inicial va ser menor que la de referència amb un 30% aproximadament. Mentre que, a una edat de 28 dies, la substitució d'escòria es va comportar de manera similar a la de referència, i els llots de rentatge per sota un 12%.

Finalment, l'assaig amb un esquelet granular totalment reciclat va ser l'escenari de pitjor comportament per a tots els requisits perquè no va complir amb cap d'elles.

CONTENIDO GENERAL

CAPITULO I INTRODUCCION 1

1.1 ANTECEDENTES 1

1.2 OBJETIVOS 2

1.2.1 Objetivo General 2

1.2.2 Objetivos Específicos 2

CAPITULO II ESTADO DEL ARTE 3

2.1 INTRODUCCION 3

2.2 MATERIAL CEMENTICIO 4

2.2.1 Sustituciones de Cemento 5

2.2.1.1 Escoria de Alto Horno 6

2.2.1.2 Lodos de Lavado 9

2.2.1.2.1 Procesos del Hormigón Residual 10

2.3 ÁRIDOS RECICLADOS 11

2.3.1 Producción del Árido Reciclado 13

2.3.2 Propiedades de los Áridos Reciclados 14

2.3.2.1 Granulometría 16

2.3.2.1.1 Porcentaje de Finos 16

2.3.2.1.2 Mortero Adherido 17

2.3.2.2 Densidad y Absorción 17

2.3.3 Usos y Aplicaciones 18

CAPITULO III CAMPAÑA EXPERIMENTAL 20

3.1 METODOLOGIA 20

3.2 PLAN DE TRABAJO 21

3.3 MATERIALES 22

3.3.1 Materiales Empleados 23
3.3.2 Caracterización de Materiales 28
3.3.2.1 Características Geométricas 28
3.3.2.1.1 Granulometría de Adiciones 28
3.3.2.1.2 Granulometria de áridos Finos Reciclados 31
3.3.3.1 Características Físicas 32
3.3.3.1.1 Densidad de las Adiciones 32
3.3.3.1.2 Absorción de Esqueleto Granular Reciclado 36
3.3.3.1.3 Contenido de Humedad del Esqueleto Granular Reciclado 38
3.4 DOSIFICACIONES Y PROCESO DE FABRICACIÓN 39
3.4.1 Hormigón con Lodos de Lavado 40
3.4.2 Hormigón con Escoria 42
3.4.3 Hormigón con Áridos Reciclados 44
3.4.4 Hormigón de Referencia 46
3.5 PROPIEDADES DEL HORMIGÓN 48
3.5.1 Propiedades en Estado Fresco 48
3.5.1.1 Ensayo de Escurrimiento 49
3.5.1.2 Ensayo Embudo en V 51
3.5.2 Propiedades en Estado Endurecido 53
3.5.2.1 Resistencia a Compresión 53
CAPITULO IV ANALISIS DE RESULTADOS 56
4.1 RESULTADOS Y ANALISIS DE LOS HORMIGONES 56
4.1.1 En Estado Fresco 56
4.1.2 En Estado Endurecido 60
CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 64
5.1 CONCLUSIONES GENERALES 64

5.2 CONCLUSIONES ESPECIFICAS 64

5.3 RECOMENDACIONES 65

5.4 FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION 66

CAPITULO VI REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 67

ANEJOS

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Tipos de escorias según su tratamiento. 6
Ilustración 2. Hormigón Residual (León, 2007) 9
Ilustración 3. Proceso de obtención de Árido Reciclado 13
Ilustración 4. Descripción de los componentes de categorías de áridos reciclados gruesos. 15
Ilustración 5. Categorías para los componentes de los áridos reciclados gruesos. 15
Ilustración 6. Máximo contenido de impurezas según el árido reciclado 18
Ilustración 7. Cemento Portland utilizado en la campaña experimental 23
Ilustración 8. Árido fino 0/2 utilizado 24
Ilustración 9. Árido grueso 6/12 utilizado 25
Ilustración 10. Aditivos acelerante y superplastificante utilizados 26
Ilustración 11. Lodos de lavado 26
Ilustración 12. Escoria ED-FR4-CuD utilizada 27
Ilustración 13. Esqueleto granular de ARH utilizado 28
Ilustración 14. Tamaño de material de adición entregada 29
Ilustración 15. Procedimiento de ensayo de granulometría de filler 29
Ilustración 16. Obtención de adición - granulometría adecuada a) escoria, b) lodos de lavado 30
Ilustración 17. Ensayo de granulometría a ARH fino 31
Ilustración 18. Granulometría de áridos finos reciclados 32
Ilustración 19. Secado de muestras en horno – a) lodos de lavado, b) escoria 33
Ilustración 20. Picnómetro introducido en baño termostático 34
Ilustración 21. Picnómetro con material filler 35
Ilustración 22. Curva de absorción de Áridos Reciclados de Hormigón – ARH 38
Ilustración 23. Muestras de áridos reciclados secas a 24 horas a) árido reciclado fino, b) árido reciclado grueso 39
Ilustración 24. Proceso de fabricación con lodos de lavado a) adición de lodos, b) mezclado, c) mezcla final. 42
Ilustración 25. Proceso de fabricación con escoria ED-FR4-CuD a) materiales a emplear, b) mezclado, c) mezcla final. 44

Ilustración 26. Fabricación de hormigón con áridos reciclados a) materiales a utilizar, b) mezcla final. 46
Ilustración 27. Finalización de amasado de hormigón referencia 48
Ilustración 28. Montaje de ensayo de escurrimiento 49
Ilustración 29. Proceso de ensayo de escurrimiento 50
Ilustración 30. Montaje para ensayo embudo en V 51
Ilustración 31. Proceso de ensayo embudo en V 52
Ilustración 32. Probetas cilíndricas para ensayo a compresión 54
Ilustración 33. a) Probetas en proceso de ensayo y b) ubicadas en cámara húmeda de LATEM. 55
Ilustración 34. Equipo utilizado para ensayo resistencia a compresión – IBERTEST MEH 3000 55
Ilustración 35. Representación gráfica del ensayo de escurrimiento 57
Ilustración 36. Representación gráfica del ensayo embudo en V 58
Ilustración 37. Extensión de tortas a) escorias b) áridos reciclados 59
Ilustración 38. Resistencias a compresión de cada dosificación 62
Ilustración 39. Modos de rotura en probetas cilíndricas. 63
Ilustración 40. Modos de rotura de dosificaciones. a) HRef, b) HL, c) HE, d) HAR 63

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Porcentajes máximos de escorias molidas según el tipo de hormigón para CEM I... 7
Tabla 2. Requerimientos prestacionales para la campaña experimental 21
Tabla 3. Dosificación de referencia suministrada por Hormipresa..... 22
Tabla 4. Resumen de datos ensayo de densidad de las adiciones 35
Tabla 5. Resumen de densidades obtenidas..... 36
Tabla 6. Porcentaje de absorción de áridos reciclados 37
Tabla 7. Tabla de contenido de humedad en áridos..... 39
Tabla 8. Dosificación de hormigón con sustitución de lodos de lavado 20%..... 41
Tabla 9. Dosificación de hormigón con sustitución de escoria ED-FR4-CuD 20% 43
Tabla 10. Dosificación de hormigón con 100% de áridos reciclados 45
Tabla 11. Dosificación de hormigón de referencia 47
Tabla 12. Requisitos generales para autocompactibilidad 50
Tabla 13. Clases de escurrimiento 53
Tabla 14. Clases de viscosidad 53
Tabla 15. Resumen de ensayo de escurrimiento 56
Tabla 16. Resumen de ensayo de embudo en V 57
Tabla 17. Resumen de resistencias a compresión en edades ensayadas..... 60

CAPITULO I INTRODUCCION

1.1 ANTECEDENTES

Sin duda el hormigón estructural y su composición ha sido de los materiales más utilizados en el siglo XXI, donde ha permitido la construcción de miles de viviendas, edificios, carreteras, etc. Existen muchos estudios que afirman que la práctica de esta actividad de la construcción consume entre el 20% y 50% de los recursos naturales y además generan un gran número de residuos que terminan en un vertedor al cumplir con su vida útil (González Arias, 2012).

Las civilizaciones pasadas reutilizaban materiales de sus obras destruidas o antiguas para crear nuevas obras, sin embargo, la evolución del transporte, y la gran demanda del hormigón hizo que este aumente significativamente y nos arrastró a un problema de nivel ambiental.

La composición del hormigón tiene como materia prima al cemento portland, material adquirido por medio del proceso de pulverización del clinker; como bien se sabe, es el principal elemento que genera una gran cantidad de gases de efecto invernadero, esto se debe a que se calcina la piedra caliza y para ello se tiene también un alto consumo energético (González Arias, 2012), pero no es el único compuesto que genera CO2, puesto que los áridos naturales y acero de refuerzo van de la mano.

Gracias a este problema ambiental, se han realizado investigaciones y estudios donde se desea concientizar la idea de reducir total o parcialmente el clínker como factor más contaminante pero también se ha desarrollado la sustitución de los áridos naturales y acero de refuerzo por subproductos industriales como áridos reciclados procedentes de residuos de

hormigones deshechos y, por otro lado, fibras que buscan reemplazar parcialmente al acero de refuerzo tradicional. Todo esto conlleva el único objetivo de un alcanzar un "hormigón sostenible" sin alterar sus características o propiedades, más bien, igualarlas o superarlas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Evaluar la influencia e interacción de los subproductos utilizados como sustitutos parcial o total que permitan generar un hormigón estructural que se desempeñe con los requisitos prestacionales indicados, con el propósito de que este hormigón se desarrolle de una manera más sostenible y ecológica gracias a la reutilización de los materiales sustitutos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar sustituciones con un porcentaje del 20% del peso de cemento en dosificaciones independientes por escoria ED-FR4-CuD y lodos de lavado en base a una dosificación proporcionada.
- Efectuar una sustitución total del esqueleto granular por áridos reciclados procedentes de hormigón.
- Evaluar y analizar el comportamiento de estos hormigones frente a las propiedades en estado fresco como en estado endurecido respecto a los requerimientos prestacionales señalados.

CAPITULO II ESTADO DEL ARTE

2.1 INTRODUCCION

Actualmente, todos los proyectos de construcción conllevan efectos positivos y negativos. El efecto negativo que más inquieta se centra en la generación de CO2 que contiene el hormigón y lo que se busca es neutralizarlo. Existen muchos estudios que gracias a ellos poco a poco se ha logrado un hormigón amigable con el medio ambiente disipando cierto porcentaje de estos gases de efecto invernadero en la dosificación utilizando diferentes estrategias.

La industria cementera se ha visto afectada por interrogantes como CO2 neutro, hormigón sostenible, carbono neutro que los ha llevado a modificar de cierta manera uno de los componentes de su materia prima principal, la estrategia principal que se tiene es la reducción del clinker, en este caso por medio de los subproductos industriales que nos proporciona escorias, polvos, lodos, etc, para evaluar comportamientos del hormigón debido a esta alteración en su confección puesto que no debe alterar sus prestaciones para el uso correspondiente.

Es así, que el sector de la construcción y con más profundidad el sector 'cementero' debe reorientarse hacia un material con desarrollo más sostenible. Es preciso incidir en estrategias de reutilización y reciclaje del mismo para que no exista tanta repercusión en el entorno y un consumo razonable para abaratar costos de producción y sobre todo emisiones de gases de efecto invernadero (González Arias, 2012).

Por otro lado, se han desarrollado normativas específicas para la implementación de los áridos reciclados en el hormigón estructural concluyendo así, la sustitución parcial o total de los áridos naturales que cumplan las especificaciones de normativa, como lo menciona el Anejo 15 del Código Estructural. Como segunda opción se habla sobre la sustitución de los agregados naturales debido a la problemática que se tiene por la explotación de estos recursos en canteras y exigencias medio ambientales por subproductos obtenidos en las trituraciones de las demoliciones de cualquier industria o en los mismos vertederos; es ahí donde se consiguen el árido reciclado que son reemplazados en porcentaje una vez que han cumplido el proceso correcto en el cual se separan y caracterizan los agregados gruesos y finos. Esto supondrá un ahorro económico y al mismo tiempo una contribución a la sostenibilidad (Fiol Olivan, 2016).

También, de los vertederos se obtienen diversos materiales reciclados que buscan ser reutilizados y pasan por un proceso de clasificación para después de su selección incorporarse a la industria de la construcción como contribuyentes de las dosificaciones para varios tipos de hormigones, estos suelen ser: neumáticos reciclados, vidrio, metal, acero y de estos se logra obtener fibras metálicas, de vidrio, etc., que aportan resistencia y sustituyen en porcentaje al agregado natural, material tradicional.

El proceso de estas investigaciones sobre la sustitución parcial de los componentes del hormigón es tanta que aún se ensayan, sin embargo, el Código Estructural ya tiene apartados donde las permiten hasta cierto porcentaje y con sus debidas características previo a ensayos; ya que las primeras sustituciones se realizaron para hormigones pobres y de baja resistencia, pero el fin de estos estudios, es lograr un hormigón estructural sostenible con altas prestaciones que se puedan usar en obras de gran envergadura.

Hoy en día, la sostenibilidad está muy enfocada en el sector de la construcción para establecer una mejor relación con el medio ambiente pues es el segundo material más usado en el mundo.

2.2 MATERIAL CEMENTICIO

Como bien se sabe la industria cementera es la primera implicada en los estudios sobre la economía circular que busca reducir el efecto negativo medioambiental más importante que es la generación de gases de CO2 que oscila alrededor del 8% y también esta industria es la consumidora de aproximadamente el 14% de energía total. (Rúa-Suárez et al., 2022).

Para mitigar este problema ambiental, implementar adiciones en la confección del hormigón resulta ser una forma viable hasta cierto punto ya que hoy en día estas adiciones se originan de subproductos que están en vertederos sin uso alguno. Se han efectuado ciento de pruebas con diferentes tipos de materiales reemplazantes de cemento (adiciones) para medir su comportamiento tanto a corto como a largo plazo y sus resultados han sido los esperados. Las adiciones más comunes usadas para este fin son: escoria de alto horno, cenizas volantes o humo de sílice (Skibsted & Snellings, 2019)

Este nuevo material sustituyente al ser sometido a los ensayos de manera comparativa con el hormigón tradicional en sus propiedades está arrojando resultados positivos tanto en características como en la reducción de emisión de CO2, mermando un rango del 26-45% de este último inconveniente mencionado. (Tejedor Montagud, 2019).

Al mismo tiempo que se estudia el tratamiento e implementación de estos materiales, se realizan campañas o estudios más específicos para conocer los demás componentes que pueden ser modificados y lograr una sostenibilidad más efectiva; es por eso que también existe una publicación sobre el "Pacto Verde Europeo" que consiste en una estrategia sectorial de la hoja de ruta llamada "Enfoque de las 5Cs" donde intervienen toda la cadena de valor: clinker, cemento, concreto, construcción y (re) carbonatación. Se identificaron estas áreas en las que se puede disminuir significativamente las emisiones y en este caso, se habla de la reducción del cemento mediante la sustitución del mismo por subproductos. Este Pacto Verde Europeo tiene como objetivo que Europa sea el primer continente climáticamente neutro en el año 2050.

Al presente sabemos que el clínker es el componente más contaminante con un 60-65% de las emisiones de CO2 de la fabricación del cemento; el resto de emisiones provienen de combustibles para que el horno funcione. Es por esto, que mediante estudios exhaustivos se ha llegado a conocer oportunidades para reducir estas emisiones causadas por clínker como: uso de materias primeras descarbonatadas, uno de combustibles de biomasa, clinkeres bajos en carbono y eficiencia térmica. (Haro, 2020).

2.2.1 Sustituciones de Cemento

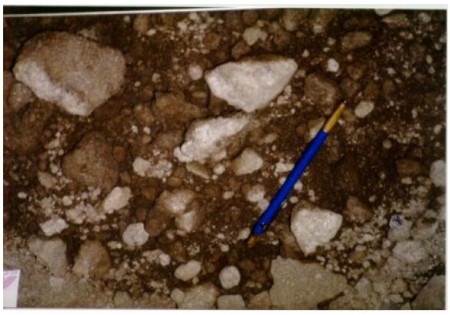
Como se mencionó en el apartado 2.2 las sustituciones de cementos más empleadas son: escorias, cenizas volantes, humo de sílice, etc. Estas adiciones al interactuar con agua y una solución alcalina se activan y poseen características beneficiosas que ayudan al hormigón

conservar o mejorar sus propiedades mecánicas y sobre todo ayudan a la baja emisión de CO2 al ser usadas como reemplazo del cemento.

2.2.1.1 Escoria de Alto Horno

La escoria de alto horno se produce como consecuencia del proceso de minerales de hierro, este material en efecto es un desecho lo que resulta curioso conocer si es posible su utilización como adición en la confección de un hormigón.

Existen diferentes técnicas que pueden ser usadas para el tratamiento de este material, obteniendo diferentes características de utilización como, por ejemplo: escorias cristalizadas, granuladas o dilatadas.



Escoria cristalizada

Escoria granulada

Ilustración 1. Tipos de escorias según su tratamiento.

Según (CEDEX, 2011) la producción total de escorias de alto horno es aproximadamente 12.015.180 millones de toneladas y estas se clasifican en granuladas y cristalizas. Las escorias granuladas se utilizan alrededor de un 66% fundamentalmente en la fabricación de cementos.

Como ya se sabe, el material que se genera luego del proceso de enfriamiento son las que se presentan en la Ilustración 1, para este trabajo nos enfocaremos en las escorias granuladas.

"*La escoria granulada se obtiene por enfriamiento brusco de la escoria líquida, que cae sobre un chorro potente de agua fría y de esa forma se expande y con el mismo chorro de agua llega hasta las balsas de decantación. Este proceso es el que se denomina granulación ya que la escoria se descompone en pequeñas partículas alveolares similares a la arena*" (CEDEX, 2011). Para introducirla a la industria del cemento debe pasar por un proceso de

secado previo y luego ser molidas hasta llegar al tamaño de una partícula fina similar al cemento portland que por lo general es la que pasa por el tamiz 0.063mm.

En cantidades industriales, las escorias se secan en tambores rotatorios, luego pasan a ser molidas en molinos de bolas que consiste en un tambor de acero, horizontal y giratorio que contiene una carga importante de bolas de acero con un tamaño entre 25 – 50 mm (CEDEX, 2011) .

Las escorias de alto horno cuentan con propiedades físicas siendo estas: tamaño de partícula es de 0/6 mm, es decir, entra dentro de la granulometría de la arena, ya que estas pueden ser añadidas como adiciones al cemento directamente o como agregado fino.

La densidad relativa de la escoria granulada dependerá de su actividad, si estas son activas presentan densidades más bajas, por el contrario, su densidad es alta si estas son poco activas. Este valor rodea los 2,86. Por otro lado, la densidad aparente de la escoria granulada varía entre 0,5 y 1,5 t/m³.

Presenta también un ángulo de rozamiento interno de 60˚, es alveolar y friable, esta última se toma en cuenta por la cantidad de finos por medio del ensayo de molienda. También, el contenido de agua varia del 5 al 25% o incluso más si estas escorias son de densidad baja.

La finura de las escorias cuando van a ser utilizadas para la fabricación de cemento puede presentar un valor de 400 a 500 m²/kg, y cuando se emplean en la confección de hormigón deben tener un tamaño máximo de 0,2mm.

Según la norma UNE 83481:1996, existe un criterio de general de porcentaje de escoria que puede ser añadida y que debe guardar relación con la presencia y tipo de armaduras, y esa cantidad no debe reducir la proporción de clinker a limites inferiores que los cementos tipo CEM II para hormigón en masa.

Siguiendo el criterio antes mencionado se resuelve que las escorias granuladas de alto horno se pueden añadir al cemento tipo CEM I limitándose a la siguiente tabla.

Tabla 1. Porcentajes máximos de escorias molidas según el tipo de hormigón para CEM I

Hormigón en masa	Hormigón armado	Mortero
70	50	70

Identificando estos límites de porcentajes según normativa, se puede continuar con un diseño de mezcla que incluya esta adición y teniendo en cuenta que sigue el mismo procedimiento que una confección para hormigón convencional. Por otro lado, si es necesario proceder a una corrección de contenido de agua de la mezcla ya que las escorias provocan que la mezcla sea más fluida, es decir, una reducción de contenido de agua es fundamental si se habla de un hormigón convencional, pero para el caso de este proyecto, como se tiene un hormigón autocompactante, el uso de este material como adición favorece a la propiedad de autocompatibilidad, también con la ayuda de los aditivos superplastificantes.

Para un diseño de mezcla eficiente, se necesita conocer la densidad de estas escorias y el procedimiento restante es similar al del hormigón convencional.

Las ventajas que ofrecen estas escorias granuladas de alto horno son precisamente en estado fresco porque asegura una buena trabajabilidad, es decir, una puesta en obra menos complicada y ayuda a una mejor compactación. Es importante saber también que si este material se usara como sustituto del cemento el tamaño de las partículas deben ser homogéneas para garantizar comportamientos similares sin generar inconvenientes en la mezcla.

Es importante que el tamaño de partículas sea similar al del cemento cuando esta sea implementada como adición al hormigón porque así evitamos o reducimos el efecto de exudación, por el contrario, cuando están no son similares este efecto aumenta.

Otro aspecto que hay que tener presente es la resistencia mecánica que las escorias granuladas ofrecen ya sea al hormigón como al mortero y que esta va a depender de factores indicados anteriormente: contenido de agua, caracterización de las escorias, curado y temperatura, esta última está relacionada a la resistencia de edades tempranas ya que, si el ambiente de curado cuando en estado endurecido está a altas temperaturas se obtiene una resistencia más alta, sino se ralentiza.

La utilización de estos subproductos obtenidos por medio de residuos tiene hoy en día una gran importancia y ventajas en el ámbito ambiental. Por ejemplo: la disminución parcial o total del volumen de residuos hacen que se elimine el acopio de estos, la conservación de los recursos naturales a causa de la valorización de los residuos generados, la generación de hormigones especiales con características determinadas y mejoradas y la más trascendental, la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero debido a que este uso de material

puede reducir hasta 700 kg de gas por tonelada de cemento fabricado. Evidentemente existirán desventajas también. (CEDEX, 2011).

2.2.1.2 Lodos de Lavado

Los lodos de lavado u hormigón residual no es más que residuo que queda en el mixer al terminar de hormigonar, pero no es el único desecho que se genera, también existe el excedente de hormigón y otros residuos.

El excedente de hormigón se refiere a esa cantidad que sobra o es rechazada después de su distribución, mientras que los otros residuos que se presentan son los que se ensayan para que este sea aceptado, por ejemplo, el ensayo de consistencia o cono de Abrams y las probetas cilíndricas que se ensayan para comprobar la resistencia del hormigón solicitado.

Las propiedades que tenga este hormigón residual dependerán del hormigón de origen, pero teniendo en cuenta que pueden estar por debajo por la cantidad de agua que reciben al ser eliminados del mixer.

Existen también, dos tipos de lodos de concreto que pueden ser: secos y húmedos.

Ilustración 2. Hormigón Residual (León, 2007)

Estadísticamente en el año 2006, la producción de hormigón alcanzó en España una cifra de 97.761.000 m³ y teniendo en cuenta que la cantidad de estos residuos anualmente esta por el 1%, el residuo aproximado generado es de 977610 m³, en cuanto al hormigón residual que es el que nos interesa en este proyecto, si se tiene un mixer de 9 m³ al ser vaciado quedan

aproximadamente 270 kg de hormigón adherido que se lo puede eliminar con una manguera de agua a presión siendo y utilizando alrededor de 300 a 600 litros de agua, que esto genera gasto de ese servicio y alteraciones a las propiedades de hormigón para este residuo que se pretende utilizar como reemplazo en la confección del hormigón.

Debemos tomar conciencia que la valorización de todos estos residuos en mención es de total importancia porque intervienen dos ámbitos transcendentales: económico y medioambiental.

Se habla del tema económico debido a que este hormigón genera un costo de traslado y preparación y, por otro lado, un tema medioambiental ya que este residuo no hace más que crear contaminación si no es reutilizado de manera correcta.

2.2.1.2.1 Procesos del Hormigón Residual

Existen dos procesos para la obtención del hormigón: mecánico y químico.

Procedimiento Mecánico

Este equipo está compuesto por una tolva donde se recepta el material de varios mixers a la vez para agilizar el proceso y luego se proyecta el agua a presión dentro de las mismas. El material reciclado que se obtiene de este residuo se puede separar en dos etapas: pasta y agregado grueso. Para la obtención de estas dos partes, se introduce en una maquina separadora que mediante agitación logra apartar los áridos gruesos de la pasta (cemento, agua y áridos finos), estos áridos gruesos son retirados por la maquina y se almacenan para usarlos como árido grueso reciclado.

Supongamos que existen otras sub etapas para el tratamiento de la mezcla agua/cemento, pues se busca lograr una recuperación máximo de estos elementos. Se tiene entonces, una balsa recuperadora que consiste en sedimentar los finos y esa agua pretratada poder usarla como agua de limpieza para los próximos mixers que lleguen. Otra etapa que se puede implementar es la utilización de filtros, donde los finos que quedan suspendidos con el agua pasen por estos filtros y limpien el agua para que pueda ser reutilizada ya sea en agua de limpieza o agua para fabricación de hormigón. Estas dos etapas presentan inconvenientes ya que no son procesos continuos.

Procedimiento químico

Se emplean aditivos estabilizadores de la hidratación para detener o ralentizar el fraguado del hormigón hasta por días pudiendo así usar ese hormigón incluso para uno nuevo.

Los estabilizadores que implementan son:

- Pre/blend system (Sistema de premezcla)
- Dosage by truck system (Dosificación por hormigonera)
- Reutilizacion de Hormigón fresco

Según un estudio realizado por (Pocius et al., 2023) que comprende en la sustitución del cemento por siete composiciones que contienen lodos de lavado húmedos y secos con un porcentaje del 0 a 30% arrojan resultados tales que con lodos secos y un 5% de sustitución no afectan significativamente las propiedades del hormigón endurecido y que de hecho provocan un deterioro en ellas, por el contrario, utilizando lodos en estado húmedo y una sustitución del 10% el hormigón endurecido respondió de mejor manera y se puede decir es la recomendada para su uso.

Mediante otro estudio se utilizaron cenizas de lodos pulverizados mezcladas con cemento para una mezcla de hormigón, estos lodos son tratados mediante una depuradora a 550 ºC y así eliminar materiales orgánicos. Luego se recogen estas cenizas de lodos se pulverizan hasta cierto tamaño y son incorporadas al cemento. Resultó que con estas cenizas de lodos la trabajabilidad del hormigón mejoró a medida que el contenido de cenizas aumenta. La resistencia a compresión a los 28 días con un 10% de sustitución se comportaba igual que un hormigón convencional pero cuando se produce una sustitución hasta un 40% de sustitución la resistencia cae un 50%. (Goh et al., 2003)

2.3 ÁRIDOS RECICLADOS

Los áridos reciclados nacen mediante el proceso de demolición o residuos de construcción, dependiendo de la naturaleza de los residuos se pueden dividir en áridos reciclados procedentes de hormigón, cerámicos o mixtos. Los más comunes son los áridos reciclados de hormigón que esperan usarse como áridos en una confección de hormigón. En el presente proyecto se utilizarán áridos reciclados procedentes de hormigón.

Hay que resaltar la principal diferencia entre el árido natural y el reciclado y es simplemente los componentes entre ellos ya que luego de las demoliciones y procesos de trituración correspondientes a los áridos lo que difiere es el mortero adherido a la superficie del árido reciclado; es decir, el árido reciclado contiene mortero adherido en su superficie y también árido natural viejo (kraljevich, 2020).

La necesidad de utilizar áridos reciclados es una gran oportunidad para atacar de frente al problema medioambiental, a pesar de que si hablamos de propiedades o términos técnicos este material reciclado tiene peor comportamiento que los naturales debido a su origen. Sin embargo, las características y exigencias de los áridos reciclados dependerán de muchos factores por su grado de limpieza o técnicas de procesamiento. (Fiol Olivan, 2016)

Las primeras incorporaciones de los áridos reciclados fueron para base, subbase, pavimentos o para hormigón de baja resistencias o no estructurales. Sin embargo, España ya cuenta con una normativa del Código Estructural Anejo 15, donde se especifica el uso de áridos reciclados para hormigones estructurales.

Existen varios estudios con una gran dispersión de resultados debido al tratamiento previo que se le ha otorgado a los áridos reciclados, sin embargo, muchos de ellos coinciden en que la fracción fina suele empeorar las propiedades del hormigón reciclado por lo que recomiendan que se sustituya la fracción gruesa para un hormigón estructural. Básicamente, para el análisis de las propiedades y comportamiento de este hormigón reciclado estudiado se compara con un hormigón de referencia y una sustitución establecida en porcentaje.

Según el Instituto del Cemento y Hormigón de Chile, desde hace 10 años ha liderado una investigación que busca la inclusión de áridos reciclado en porcentaje en la mezcla del hormigón convencional. Aunque se conoce que los áridos reciclados provienen de diferentes fuentes como residuos de demoliciones del mismo hormigón, residuos cerámicos u otros elementos sólidos, el más importante y confiable es el residuo que procede de las demoliciones de hormigón debido a que podría reaccionar de mejor manera frente a un hormigón nuevo.

Ilustración 3. Proceso de obtención de Árido Reciclado

2.3.1 Producción del Árido Reciclado

Se dividen en dos etapas o fases independientes para poder implementar este árido procedente de demoliciones de hormigón.

- Demolición selectiva en origen: se recomienda que en la demolición de elementos de hormigón se tenga la debida precaución y se logre separar todos los escombros que no pertenezcan a hormigón como tal para que no influyan en las propiedades de los áridos reciclados.
- Transformación de escombros de demolición en áridos: en este caso las plantas de producción de áridos naturales son similares a las de áridos reciclados, añadiendo a la última imanes para que lograr la separación del acero y otras impurezas.

Para la obtención de los áridos reciclados, en las plantas de producción debe existir el equipo mínimo requerido, por ejemplo: machacadoras, cribas, transportadores y equipos que logren eliminar impurezas.

Como todo proceso, este inicia por la recepción de los camiones que contienen los escombros, estos escombros tienen que tener un tamaño accesible y apropiado para poder introducirlos en la machacadora primaria. Después, pasan por el sistema de trituración que puede ser de mandíbulas, impactos o conos.

El sistema de trituración de mandíbulas genera un tamaño de árido caso homogéneo que sirve para la producción de un nuevo hormigón ya que produce una cantidad de finos menor al 10% (Sánchez de Juan, 2004).

Las trituradoras de impacto se acoplan mejor para generar áridos reciclados para carreteras, el inconveniente es el desgaste por estos impactos y producen una gran cantidad de finos.

Por último, la trituradora de conos tiene un tamaño admisible de 200mm y genera un contenido de finos menor al 20%.

El siguiente paso para la producción de este árido una vez triturado es el sistema de cribado donde se clasificará por granulometría los productos.

Una vez exista ya la granulometría de estos, se procede a la eliminación de impurezas puesto que se requiere el árido reciclado lo más limpio; existen tres sistemas para lograr esta etapa: tamizado, separación magnética o eliminación manual.

El tamizado conseguirá eliminar lo más pequeño posible y dependiendo de la repetibilidad se logrará un árido reciclado más puro. El segundo sistema consta de la separación magnética que como su nombre lo indica cuenta con una cinta magnética donde se consigue separar las armaduras de estos escombros. Como ultimo sistema se tiene a la eliminación manual donde se logra extraer las impurezas de mayor tamaño.

2.3.2 Propiedades de los Áridos Reciclados

Las características de los áridos reciclados tienen que ser lo suficientemente adecuadas para que logren alcanzar las propiedades requeridas como resistencia y durabilidad del hormigón a desarrollar.

Según el Código Estructural, Anejo 15 *"Recomendaciones para la utilización de hormigón reciclados"* se deben cumplir con ciertos límites para que no reflejen afectaciones considerables dentro de sus propiedades. Se recomienda el uso de árido grueso reciclado al 20% en peso sobre el árido grueso total y para resistencias no mayores de 40 N/mm2, de lo contrario por medio de campañas experimentales deberá justificarse la implementación de un porcentaje mayor al indicado en normativa. Si se usara árido reciclado iguales o menores al 20% como se mencionó las densidades continúan normales, por el contrario, si son superiores al 20% la densidad disminuirá con respecto a un hormigón convencional. Es importante mencionar el porcentaje de árido que se requiere en este proyecto ya que al ser del 100%.

Se designa a los áridos reciclados con la letra R por su naturaleza, esta designación deriva categorías con las que se puede clasificar de mejor manera a los áridos reciclados. Las categorías y descripción de cada componente según la Norma EN 12620:2003+A1:2009 son:

Componente	Descripción
Rc	Hormigón, productos de hormigón, mortero Elementos de albañilería de hormigón
Ru	Áridos no ligados, piedra natural Árido ligado hidráulicamente
Rb	Elementos de albañilería de arcilla (por ejemplo, ladrillos y tejas) Elementos de albañilería de silicato cálcico Hormigón aireado no flotante
Ra	Materiales bituminosos
FL	Material flotante en volumen
X	Otros: Cohesivo (es decir, arcilla y tierra) Misceláneos: metales (ferroso o no ferroso) Madera, plástico y goma no flotante Yeso
Rg	Vidrio

Ilustración 4. Descripción de los componentes de categorías de áridos reciclados gruesos.

Componente	Contenido Porcentaje en masa	Categoría
Rc	≥ 90	Rc_{90}
	≥ 80	Rc_{80}
	≥ 70	Rc_{70}
	≥ 50	Rc_{50}
	< 50	$Rc_{declarado}$
	Sin requisitos	Rc_{NR}
Rc + Ru	≥ 95	Rcu_{95}
	≥ 90	Rcu_{90}
	≥ 70	Rcu_{70}
	≥ 50	Rcu_{50}
	< 50	$Rcu_{declarado}$
	Sin requisitos	Rcu_{NR}
Rb	≤ 10	Rb_{10-}
	≤ 30	Rb_{30-}
	≤ 50	Rb_{50-}
	> 50	$Rb_{declarado}$
	Sin requisitos	Rb_{NR}
Ra	≤ 1	Ra_{1-}
	≤ 5	Ra_{5-}
	≤ 10	Ra_{10-}
X + Rg	≤ 0,5	$XRg_{0,5-}$
	≤ 1	XRg_{1-}
	≤ 2	XRg_{2-}
	Contenido cm^3/kg	
FL	≤ 0,2 [a]	$FL_{0,2-}$
	≤ 2	FL_{2-}
	≤ 5	FL_{5-}

[a] La categoría ≤ 0,2 está destinada sólo para aplicaciones especiales que requieran un acabado superficial de alta calidad.

Ilustración 5. Categorías para los componentes de los áridos reciclados gruesos.

Se considera que los áridos reciclados provenientes de la naturaleza del material cualquiera que esta sea: cerámicos, mixtos o provenientes de demolición de hormigón sean acopiados de manera independiente porque las propiedades de los áridos reciclados obtenidos se verán afectadas como lo son: módulo de elasticidad, retracción y fluencia. Por otro lado, otro factor influyente son los tamaños permitidos según normativa, la que indica que el mínimo permitido es de 4mm.

2.3.2.1 Granulometría

En la granulometría se ven afectadas directamente las propiedades como la trabajabilidad, durabilidad, permeabilidad y resistencia. Esta propiedad geométrica de los áridos reciclados depende mucho del proceso de trituración al que hayan sido sometidos.

Bajo normativa, los áridos reciclados deben constar un contenido de desclasificados inferiores al 10% y un porcentaje menor del 5% de material que pase el tamiz 4.

Dependiendo de la naturaleza del hormigón original y el proceso de trituración al que haya sido sometido el árido reciclado, el módulo granulométrico puede variar mínimamente y dependerá también del tamaño máximo del árido. Es cierto que los áridos reciclados provenientes de hormigones de altas resistencias tienen mejores propiedades y por ende tendrá mejor modulo granulométrico.

El porcentaje de árido grueso varía entre 70% y 90% del árido total producido, este porcentaje también depende del tamaño máximo del árido grueso reciclado producido y de la composición del hormigón original. La granulometría del árido grueso se puede englobar dentro de los usos granulométricos que prescribe el Código Estructural (Fiol Olivan, 2016).

2.3.2.1.1 Porcentaje de Finos

Debido a la manipulación de los áridos se desprende un porcentaje de fino como consecuencia del contenido de mortero adherido lo que altera el porcentaje de finos general. Este aumento de finos sobre la fracción gruesa una vez clasificadas puede oscilar entre 0,27% – 1,14%, situándose en la mayoría de los casos por debajo del límite del 1% del árido grueso establecido por el Código Estructural. Las especificaciones que incluyen las normas sobre esta propiedad establecen un límite más alto de finos para el árido reciclado, tolerando entre un 2% - 5% lo que favorece el cumplimiento de esta especificación (Sánchez de Juan, 2004).

2.3.2.1.2 Mortero Adherido

Como se mencionó anteriormente la presencia de esta propiedad es la que difiere totalmente con los áridos naturales, es por eso, que los áridos reciclados tienen mayor absorción de agua, menor densidad y resistencia. El porcentaje de mortero adherido dependerá de la relación agua/cemento del hormigón de origen (Fiol Olivan, 2016).

2.3.2.2 Densidad y Absorción

La densidad de los áridos reciclados oscila entre 2100 y 2400 kg/m3, comparados con los áridos naturales este suele ser mayor ya que es un material limpio; la densidad saturada con superficie seca de los áridos reciclados varía entre 2300 y 2500 kg/m3, por lo que se consideran áridos de densidad normal (no ligeros), por presentar un valor de densidad mayor a 2000 kg/m3 según establece la norme UNE 146120:97 "Áridos para hormigones. Especificaciones". (10)

Por otra parte, la absorción tiende a tener valores habituales entre 4% – 10% incumpliendo así el límite del 5% que establece el Código Estructural, eso sucede por la pasta adherida en el mismo lo que genera un valor elevado de esta propiedad. (Robas, 2009)

Los factores que influyen en estas propiedades son:

- Calidad del hormigón de origen: se analiza por su relación agua/cemento, es decir, a menor relación se obtendrán áridos reciclados de mejor calidad, mayor densidad y menor absorción, que es lo que se espera.
- Tamaño de las partículas: teniendo un mismo hormigón de origen se observa que las fracciones más finas tienen menor densidad y mayor absorción a comparación de las fracciones más gruesas.
- Técnicas de procesado: si en el proceso de la obtención del árido reciclado se realizan sucesivas etapas de trituración esto logra un mejor árido reciclado debido a que estará más limpio, casi igual a uno natural y genera menos absorción y mayor densidad.

Por otra parte, hay que recalcar que por el mismo origen de áridos reciclados existirán impurezas o contaminantes que indudablemente afectan de manera negativa al hormigón, uno de estos efectos es el descenso de la resistencia del mismo, por lo que, el Código Estructural nos indica mediante una tabla unos límites de impurezas que debemos cumplir para el uso correcto de este material reciclado, Ilustración 6.

Elementos	Max. contenido de impurezas % del peso total de la muestra
Material cerámico	5
Partículas ligeras	1
Asfalto	1
Otros materiales (vidrio, plásticos, metales, etc).	1,0

Ilustración 6. Máximo contenido de impurezas según el árido reciclado

2.3.3 Usos y Aplicaciones

Como se ha mencionado antes, los hormigones con áridos reciclados en sus inicios fueron experimento para hormigones de baja resistencia. Actualmente, estos hormigones abordan mucho más que esto llegando al punto de ensayarlos para que ocupen un lugar en la mezcla de hormigones estructurales; hay que recalcar que esto dependerá del origen de los áridos reciclados.

Según J.L Gálvez-Martos (2018) pueden ser utilizados en trabajos de tierra, subbases de calzadas, en este caso los requerimientos de la Unión Europea no varían en absoluto de los áridos naturales, pero una de las restricciones que afecta a las propiedades es la absorción de agua. También, se suelen usar para hormigones no estructurales donde su sustitución puede ser del 100% de áridos. Por último, para que los áridos reciclados formen parte de la dosificación de un hormigón estructural, la normativa indica que la sustitución de áridos naturales por áridos reciclados debe ser del 20% (Ahmad, 2022).

A partir de estos usos, existen casos reales donde se han aplicado previos ensayos y se ha obtenido buenos resultados.

Aplicaciones en la calzada: está compuesta por varias capas y una de esas por material granular y es ahí donde entran los áridos reciclados, ya que esta capa no necesita de una resistencia muy alta es viable esta sustitución.

Según el estudio de Kolay y Akentuan (2014), que se enfocó ene al uso de áridos reciclados como subbase de carreteras, se concluye que este material reciclado presentaba características físicas y geomecánicas similares a los naturales.

Hormigón de pavimento: en esta aplicación ya los áridos reciclados forman parte de la dosificación de una mezcla. Se han realizado investigaciones sobre este uso en una calzada bajo requerimientos definidos: tráfico pesado y condiciones meteorológicas agresivas; la respuesta de esta campaña experimental resulto un comportamiento correcto y más superior refiriéndonos a controles de edades debido a que las resistencias y durabilidad fueron adecuadas (Ahmad, 2022).

CAPITULO III CAMPAÑA EXPERIMENTAL

3.1 METODOLOGIA

Este proyecto consiste en un estudio realizado tanto investigativo como experimental para lograr los objetivos generales y específicos. Se presenta una investigación en el marco teórico donde se hace énfasis en los temas principales de este proyecto.

En el capítulo I, se engloba una idea de los antecedentes sobre el hormigón y como este ha ido creciendo a lo largo del tiempo y a gran demanda que logro generar este daño al medio ambiente, contara con los objetivos generales y específicos.

En el capítulo II se plantea el estado del arte donde están descritos los elementos que participan como sustitución en el hormigón para este trabajo, sus características, procesos de extracción, propiedades mecánicas, físicas que deben cumplir por normativa para que este sea apto.

El capítulo III se detalla minuciosamente la campaña experimental, es decir, todos los materiales, equipos y ensayos empleados a las diferentes probetas elaboradas en estado fresco como endurecido.

En el capítulo IV se hablará sobre los análisis y resultados de las probetas ensayadas.

El capítulo V, corresponde a las conclusiones generales como específicas y al mismo tiempo recomendaciones del proyecto, también estarán descritas futuras líneas de investigaciones.

Por último, la bibliografía y normativa que sirvió como guía para la escritura de este trabajo de investigación estará descrita en el capítulo VI.

Los Anejos que llevara este trabajo se podrán observar al final del documento.

3.2 PLAN DE TRABAJO

El estudio que se persigue en este proyecto consta de evaluar la sinergia de subproductos en base a las 3 dosificaciones planteadas consiguiendo se cumplan las prestaciones indicadas en la Tabla 2, debido a que se desea que este hormigón trabaje estructuralmente para elementos prefabricados como muros portantes, por lo tanto, se necesita una resistencia de edades tempranas que oscile por los 25 MPa a un día para poder asegurar detalles como izados, traslado y desembarque de estos elementos sin que afecten estructuralmente su comportamiento.

Los requisitos prestacionales a cumplir con cada una de las dosificaciones son:

Tabla 2. Requerimientos prestacionales para la campaña experimental

Requerimientos prestacionales	
Hormigón tipo	autocompactable
F'c final	50 Mpa
F'c 24h	≥ 25 Mpa

Hormipresa proporcionó una dosificación que se la tomó como referencia para este proyecto, la misma que fue diseñada para elementos muros portantes prefabricados con características establecidas en la tabla citada anteriormente, y las mismas que se persiguen en esta campaña experimental. Se trabajó con los mismos materiales mencionados en la Tabla 3 a excepción del cemento que a pesar de ser la misma resistencia y clase de cemento, no es del mismo fabricante, lo que puede provocar variaciones en resultados.

Tabla 3. Dosificación de referencia suministrada por Hormipresa

Dosificación en peso	
Material	**Cantidad**
Cemento I 52,5r (kg)	350
Arena 0 - 2 (kg)	1054
Grava 6 - 12 (kg)	893
Agua (l)	185
Chrysoxel 390 aditivo (cc)	4000
MasterEase 5250 superplast. (cc)	4000

Esta dosificación señalada en la Tabla 3 es el punto de partida para las confecciones posteriores a realizar que se fabricarán en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras y Materiales (LATEM) Luis Agullo de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la UPC, las cuales son:

- Fabricación de hormigón de referencia
- Sustitución del 20% de cemento por lodos de lavado u hormigón residual
- Sustitución del 20% de cemento por escoria ED-FR4-CuD
- Sustitución del 100% de áridos naturales por áridos reciclados de hormigón

Dichas confecciones se analizarán a edades distintas como 1, 3, 7 y 28 días desde su fabricación, permaneciendo hasta el día de ensayo en la cámara húmeda del laboratorio que se indicó para su curado. Por medio de los requerimientos prestacionales podemos intuir los ensayos en estado fresco y endurecido a los que estarán sometidos los cilindros, dichos ensayos se detallan en el apartado 3.4

A pesar de que se tiene la confección dada por Hormipresa se fabricó otra dosificación de referencia debido a que el cemento con el que se contaba en el laboratorio a pesar de ser del mismo tipo y la misma resistencia, no era del mismo fabricante.

3.3 MATERIALES

Los materiales fueron suministrados por la empresa mencionada en el apartado 3.2 y empleados en esta campaña experimental para todas las siguientes dosificaciones que se fabricaron.

3.3.1 Materiales Empleados

Cemento tipo I, 52.5R

El cemento implementado es el cemento Super Dragon tipo I 52,5R, sus características especiales son precisamente proporcionar una resistencia inicial y final muy altas y que sirve también para confeccionar hormigones prefabricados por su endurecimiento rápido. Este tipo de cemento, refiriéndonos al tipo I, es el indicado según lo indica el Anjeo 17 del Código Estructural para los hormigones autocompactantes o también los que resulten adecuados según el tipo y cantidad de adiciones que contengan.

El contenido de cemento en la dosificación inicial es de 350 kg/m³ y este varía dependiendo de los porcentajes de adiciones que se añadan. Se adjunta la ficha técnica en los anexos.

Ilustración 7. Cemento Portland utilizado en la campaña experimental

Áridos Naturales

Según el Anejo 17, para un hormigón autocompactante se requiere que el tamaño de árido grueso se limite a 25mm, siendo recomendable el uso de tamaños comprendidos entre 12 – 20mm.

El esqueleto granular ha sido considerado con la finalidad de que alcancen los mejores resultados incluyendo las confecciones con filler, manteniendo su peso de la dosificación base. La fracción de finos se manejó de 0/2 y el árido grueso de 6/12.

- **Arena 0/2**

El árido fino para la fabricación de este hormigón fue suministrado por la constructora Hormipresa, el mismo que consiste en un árido de tamaño de partícula que comprende de 0 a 2 mm, su uso puede ser aplicado en hormigones, morteros y material bituminoso. Se adjunta ficha técnica en el apartado Anexos.

Ilustración 8. Árido fino 0/2 utilizado

- **Grava 6/12**

El árido grueso para la fabricación de este hormigón fue suministrado por la constructora mencionada en el párrafo anterior, el mismo que consiste en un árido de tamaño de partícula que comprende de 6 a 12 mm, su uso puede ser aplicado en hormigón como se indica. Toda la caracterización completa está basada en las normas UNE Se adjunta ficha técnica en el apartado Anexos.

Ilustración 9. Árido grueso 6/12 utilizado

Agua

Material tomado de las tuberías del Laboratorio de Tecnología de Estructuras y Materiales de la UPC.

Aditivos

- **Aditivo Chrysoxel 390**

Aditivo acelerante de endurecimiento a base de componentes minerales y orgánicos. Sus acciones combinadas desarrollan una sinergia favorable para conseguir la hidratación de los cementos. (Chryso, 2011). Se adjunta la ficha técnica en los anexos.

- **Superplastificante MasterEase 5250**

Superplastificante o reductor de agua de alta actividad basada en polímeros, este producto permite la fabricación de hormigones de elevada fluidez, baja viscosidad, hormigones autocompactantes y de alta resistencia. (Master Builders, 2023). Se adjunta la ficha técnica en los anexos.

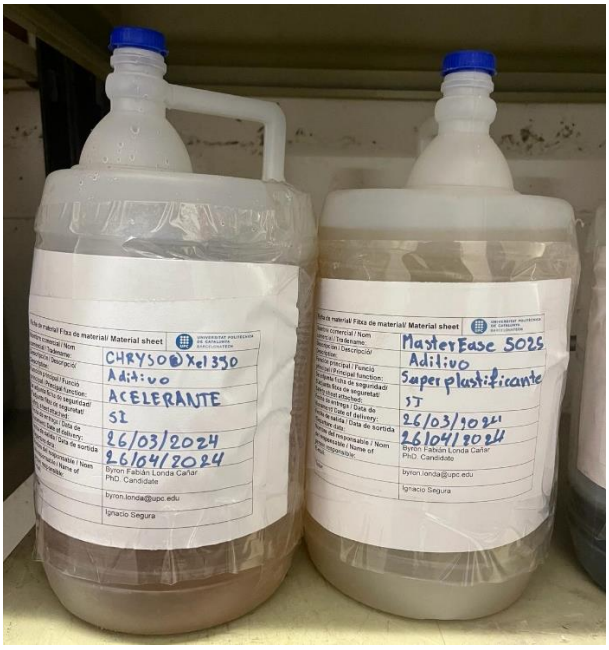


Ilustración 10. Aditivos acelerante y superplastificante utilizados

<u>Adiciones</u>

- **Lodos de Lavado**

El proceso para obtener este material se lo explico en el apartado 2.2.1.2 Lodos de Lavado, cuando se recibió el material tenía cierta humedad, así que, para continuar el proceso de generación de filler tuvo que pasar por un secado en el horno a una temperatura de 80˚ por 24 horas mínimo. En el lado izquierdo de la Ilustración 11 se observan los lodos de lavado con humedad y por la parte izquierda el material seco.

Ilustración 11. Lodos de lavado

- **Escoria ED-FR4-CuD**

  El material que se tiene como escoria es procedente de la industria del cobre, que resulta beneficioso para el medio ambiente debido a que es 100% reciclable. Básicamente estas escorias son obtenidas por el proceso de refinado de los hornos, el cual deriva 3 subetapas según las impurezas que se quieran eliminar. Las escorias generadas en el proceso de afinado tienen un alto contenido de cobre (20%). Esta escoria es una fusión de escorias utilizadas o reutilizadas en las etapas de afinado.

Ilustración 12. Escoria ED-FR4-CuD utilizada

Áridos Reciclados de Hormigón

Este material fue suministrado por la empresa Hercal, esta se dedica principalmente a la demolición circular de edificios, naves industriales, etc. de donde por medio de un proceso en su propia planta obtienen áridos reciclados de diferentes fracciones granulométricas para su reutilización en hormigones estructurales o no estructurales. Se adjunta ficha técnica de los áridos indicados en los anexos donde se describen ciertas propiedades y se señalan las fracciones granulométricas debido a que se reemplazó tanto árido fino como grueso en esta campaña.

Ilustración 13. Esqueleto granular de ARH utilizado

3.3.2 Caracterización de Materiales

A continuación, se describen los ensayos realizados para la obtención de las propiedades de los materiales sustitutos.

3.3.2.1 Características Geométricas

3.3.2.1.1 Granulometría de Adiciones

Las adiciones para este proyecto se usarán directamente para hormigón autocompactante, por lo tanto, bajo la norma UNE EN 12620:2002, este material debe ser de carácter similar al del cemento, es decir, de una granulometría similar a este.

El material que se recibió tanto lodos de lavado como escorias fue de una fracción granulométrica dispersa como se muestra en la Ilustración 14.

Ilustración 14. Tamaño de material de adición entregada

Así que, el proceso que se llevó a cabo para lograr el tamaño requerido como se mencionó anteriormente fue moler y tamizar hasta lograr que el material no sea retenido por el tamiz 0,063 mm, sino que pase.

Este ensayo granulométrico se realizó en el Laboratorio de Materiales de la Universidad Politècnica de Cataluña donde constan los equipos para este proceso. El equipo requerido fue: molino de discos vibratorio, el tamiz de tamaño requerido, la tamizadora y también se realizó a mano el tamizaje. Se efectuó el mismo procedimiento para ambos materiales como se muestra en la Ilustración 15 a continuación.

Ilustración 15. Procedimiento de ensayo de granulometría de filler

En primer lugar, se toma una muestra que será introducida en el disco, se recomienda que sea de tamaños variables, es decir, que tanto partículas finas como gruesas se coloquen en los anillos para mejor trabajabilidad del equipo, luego se ingresa el mismo dentro del molino y se baja la palanca de seguridad junto con la tapa de la máquina. Inmediatamente, se mueve la manija indicando el tiempo en segundos que se desea moler, se puede repetir este último paso para obtener un material con partículas más pequeñas. Por último, se alza la tapa con la palanca de seguridad y se retira el disco con el material alcanzado para depositarlo en una bandeja y llevarlo al siguiente paso, el tamizaje.

En la segunda parte de la Ilustración 15, se seleccionó el tamiz con luz de 0,063 mm en la tamizadora indicando en este caso el programa 'P3' que tiene una amplitud de 1 mm y un intervalo de 10 segundos que se repetirá 3 veces continuamente.

Como último paso, se tamizo de manera manual para aprovechar el material retenido en el tamiz en mención y ayudar a generar más filler como se observa en la tercera parte de la Ilustración 15.

Dando como resultado la granulometría esperada mostrada en la Ilustración 16 según la norma señalada en el apartado 3.4.1.1 para la utilización de estas adiciones.

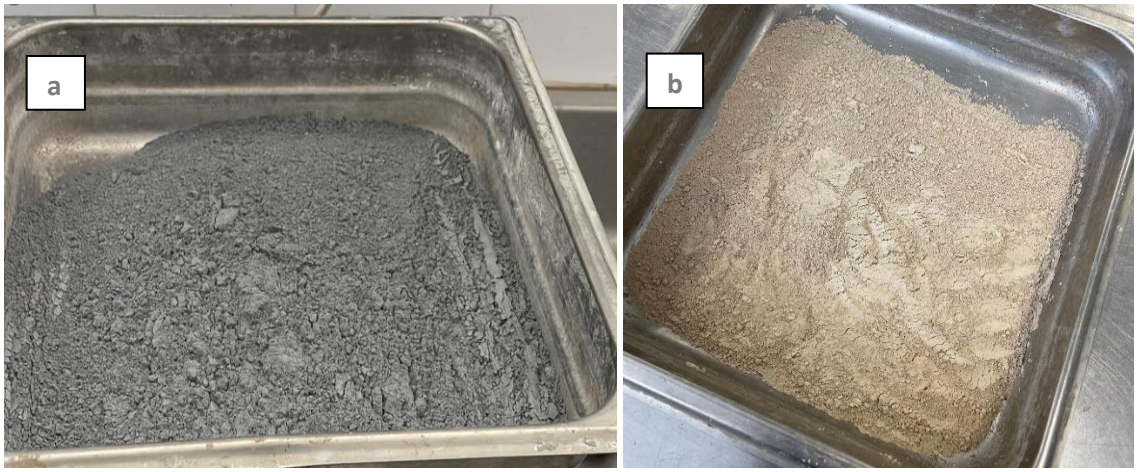


Ilustración 16. Obtención de adición - granulometría adecuada a) escoria, b) lodos de lavado

Una vez obtenido el filler se procedio a pesar lo necesario para las sustituciones que se implementaron en esta campaña.

3.3.2.1.2 Granulometria de áridos Finos Reciclados

El análisis granulométrico se llevó a cabo según indica la norma UNE-EN-933-1:2012 "Determinación de la granulometría de las partículas. Metodo del tamizado", pero este solo se realizó para los áridos finos reciclados porque para alcanzar la autocompatibilidad de una u otra manera se debe alcanzar una cantidad de finos según el Código Estructural – Anejo 17. Por este motivo, se quiso comprobar que porcentaje de este material pasaba por el 0,063 mm, aunque por ficha técnica se podía intuir que al indicar en la descripción "arena reciclada lavada" tendría ausencia del mismo, por esta razón, se realizó el ensayo de granulometría.

El material y equipo que se usó para este ensayo fueron los tamices desde el #5 y de manera descendente hasta llegar el 0,063 mm, la tamizadora, la balanza y una bandeja.

Previo al ensayo se tomó una muestra de 1kg de árido fino reciclado y como su condición fue saturada se colocó en el horno por 24 horas aproximadamente, al ser pesado luego en estado seco su peso fue de 18,77% menor, lo que indica el contenido de humedad.

Se inicio colocando en el primer tamiz, en este caso el #5, una muestra de peso conocido que pasaría hasta el fondo y por medio de la tamizadora conocer las cantidades retenidas en cada uno para luego ser pesadas. El material retenido en cada tamiz se muestra en la siguiente Ilustración 17, orientación de tamices a favor de las manecillas del reloj de izquierda a derecha.

Ilustración 17. Ensayo de granulometría a ARH fino

La grafica granulométrica se puede apreciar en la Ilustración 18

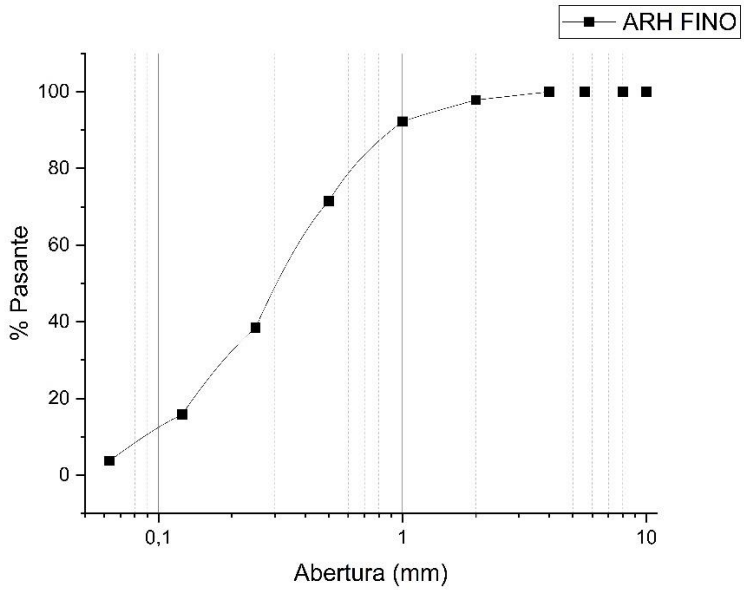


Ilustración 18. Granulometría de áridos finos reciclados

Con estos resultados se puede concluir que la cantidad de finos que pasa el tamiz 0,0063 mm es mínima para que nos resulte un hormigón con las prestaciones iniciales que se indican en el apartado 3.2 y esto sucede porque esta arena es lavada, es decir, al pasar por este proceso, la cantidad de finos se pierde automáticamente.

Los resultados del ensayo se encuentran en Anejos.

3.3.3.1 Características Físicas

3.3.3.1.1 Densidad de las Adiciones

Siguiendo la normativa prescrita UNE 1097-7:2008 *"Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos – Determinación de la densidad real del filler - Metodo del picnómetro"*. Se denomina filler al material que se obtiene de un tamizado que pasa el 0,063mm.

Los materiales a los que se le realizo el ensayo de densidad fueron: lodos de lavado y escoria ED-FR4-CuD; como se mostró en la Ilustración 14 e Ilustración 9 se recibió el material de un tamaño mucho mayor al del filler, por lo que tuvo que pasar por una caracterización anterior para efectuar esta propiedad.

Bajo la normativa en mención, el metodo del picnómetro tiene como principio determinar el volumen de las muestras y conociendo también la masa de estas, calcular su

densidad. Básicamente consiste en la diferencia de volumen y altura que existe al introducir la muestra en el picnómetro.

Los materiales y equipos implementados para la ejecución de este ensayo:

- Picnómetro
- Queroseno o Parafina
- Muestras del material secadas
- Baño maría
- Balanza
- Espátula

Para la preparación de las muestras es importante saber que esta debe ser previamente secada por mínimo 16 horas antes a una temperatura de 110˚ ± 10. En este caso, las muestras fueron dejadas en el horno por 24 horas a una temperatura de 100˚ y se cuenta con tres muestras de material filler de lodos de lavado cada una de 150g y dos muestras de filler de escoria con 100g cada una. Véase la Ilustración 19.

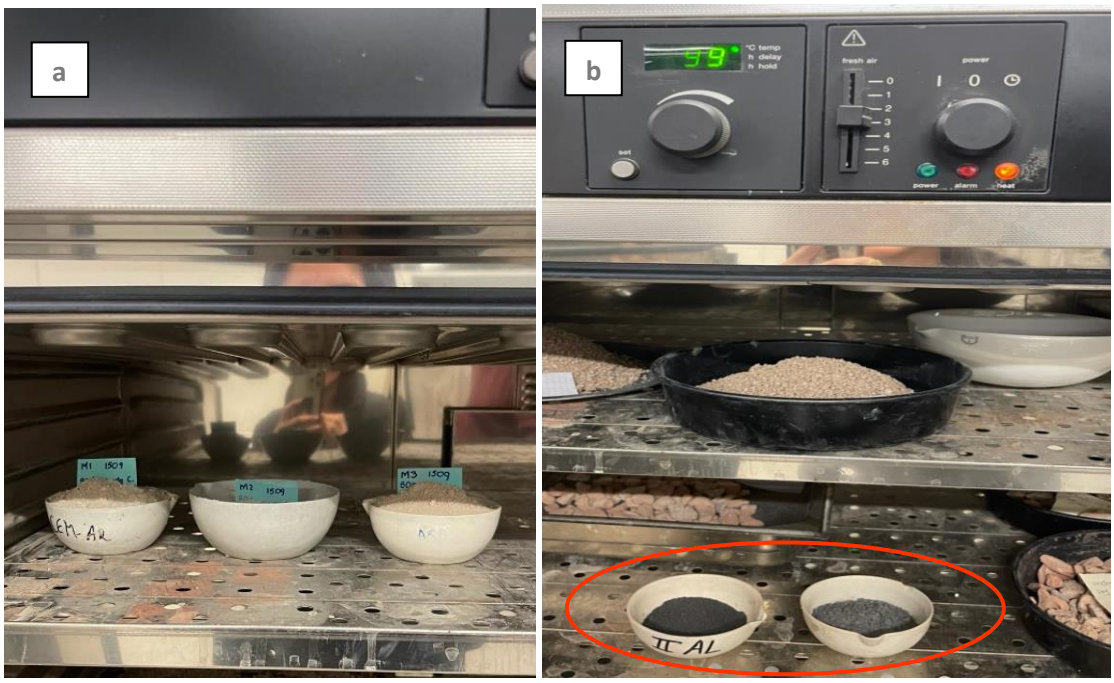


Ilustración 19. Secado de muestras en horno – a) lodos de lavado, b) escoria

Continuando con el procedimiento operatorio se tiene varios picnómetros que son previamente limpios para el uso respectivo, la maquina "PRECISTERM" se enciende a una

temperatura de 20˚ mientras que el picnómetro es llenado con el queroseno hasta una medida de 0 – 1 ml y esa medida es denominada “VI sin material” como se indica en la Tabla 4, luego el picnómetro es introducido al baño termostático (maquina “PRECISTERM”) y se deja reposar por 30 minutos, en este intervalo de tiempo se produce una variación de volumen respecto a la que ingreso, ese valor es el que es tomado en cuenta para ser restada luego con el volumen cuando el equipo contiene la muestra dentro. Véase la Ilustración 20.

Ilustración 20. Picnómetro introducido en baño termostático

Al transcurrir los 30 minutos, el picnómetro es retirado con su tapón del equipo, secado y pesado sin material obteniendo así el valor denominado “masa picnómetro sin material”, por otro lado, se toma la lectura del volumen que mencionamos al final del párrafo anterior denominándola “VF sin material”. Es momento de introducir al picnómetro el filler con mucha paciencia para evitar que se tape o exista mucho desperdicio, la cantidad de material que ingresa se mide hasta el queroseno haya aumentado a un volumen entre 22 – 23 ml, se toma nota del volumen exacto identificándolo como “VI con material” y se ingresa nuevamente al baño termostático por 30 minutos. Véase la Ilustración 21.

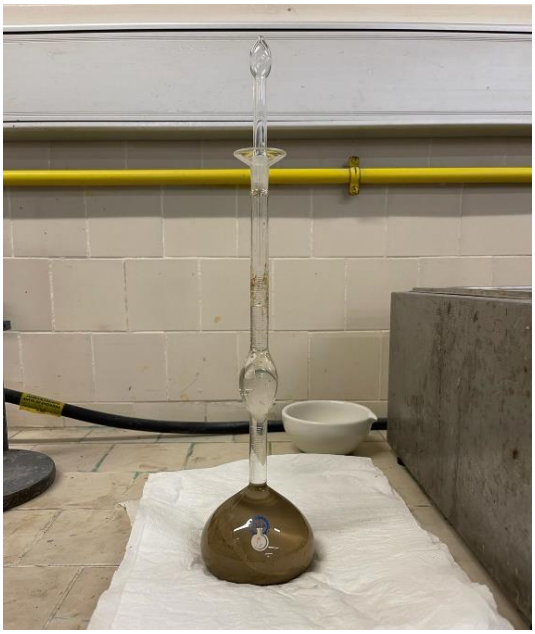


Ilustración 21. Picnómetro con material filler

Una vez pasado los últimos 30 minutos, se repite el proceso de retiro, secado y pesado, pero ahora con el material y se procede a tomar las lecturas correspondientes en este caso denominadas “VF con material” y “masa picnómetro con material”. Se recogen estos valores en la siguiente tabla citada.

Tabla 4. Resumen de datos ensayo de densidad de las adiciones

REF. NORMA EN 1097-7:2008			
Fecha de ensayo	***22/3/2024***		
Datos - Lodos de lavado			
Detalle	**Valor**		
Equipo	**Muestra 1**	**Muestra 2**	**Muestra 3**
Masa picnómetro sin material	246,5	246,3	223,8
VI sin material	0,8	0,7	0,7
VF sin material	0,6	0,6	0,6
VI con material	22,3	22,5	22,5
VF con material	22,1	22,3	21,8
Masa picnómetro con material	301,1	301,3	284,6
Datos - Escoria ED-FR4-CuD			
Masa picnómetro sin material	229	225,2	-
VI sin material	0,6	0,5	-
VF sin material	0,8	0,8	-
VI con material	22,2	22,5	-
VF con material	21,9	22,6	-
Masa picnómetro con material	285,2	280,6	-

El cálculo siguiente que se obtuvo fue la diferencia tanto de volúmenes finales sin y con material como los datos de masa del picnómetro con y sin material de igual manera. Gracias a este paso se calculan los valores de masa y volumen de cada muestra y con esto se logra calcular la densidad de cada una por medio de la formula conocida normalmente.

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Reemplazando los datos se halla el valor de densidad de cada muestra ensayada y como último paso se promedian para obtener el valor final que será tomado en cuenta en próximos cómputos. Este cálculo se refleja en la tabla mostrada a continuación.

Tabla 5. Resumen de densidades obtenidas

Resumen de cálculos			
Filler	**Peso**	**Volumen**	**Densidad real kg/m3**
Lodo de lavado	54,6	21,5	2539,535
Lodo de lavado	55	21,7	2534,562
Lodo de lavado	60,8	21	2895,238
Densidad promedio de Lodos de lavado			**2656,445**
Escoria	56,2	21,1	2663,507
Escoria	55,4	21,8	2541,284
Densidad promedio de Escoria			**2602,396**

3.3.3.1.2 Absorción de Esqueleto Granular Reciclado

Para la ejecución de este ensayo se toma como referencia la norma EN 1097-6:2014 “Anexo B – Determinación de la densidad de partículas y absorción de agua de los áridos gruesos saturados a masa constante”. Se realizó para todo el esqueleto granular reciclados.

El material implementado fue relativamente básico debido a que solo se usaron: 2 recipientes de peso conocido para cada muestra, 1kg de cada árido reciclado, agua, balanza y una bandeja que fue utilizada para pesar cada muestra saturada a determinado tiempo.

El procedimiento de ensayo consistió en pesar 1kg de cada árido reciclado a ensayar a tiempos conocidos como 0.5 hora, 1 hora, 1.5 hora, 2 horas, 18 horas, 20 horas y 24 horas y colocarlas en los recipientes con agua y dejarlos en reposo hasta ser ensayados. En cada retirada al tiempo correspondiente, el material es pesado en la bandeja al igual que los recipientes con agua y así controlar la absorción. El proceso es repetitivo hasta culminar las 24 horas.

Por medio de la fórmula mostrada a continuación se calculó el porcentaje de absorción correspondiente a cada tiempo y se generó una curva secuencial:

$$WA_{cm} = \frac{M1 - M3}{M3} * 100$$

Donde:

WA se refiere a la absorción de agua a calcular

M1 es la masa de la porción de ensayo saturada, en gramos

M3 es la masa de la porción secada en gramos, en gramos

En la siguiente tabla se detalla el porcentaje de absorción en los tiempos indicados de las dos fracciones granulométricas a ser reemplazadas. También en la Ilustración siguiente se observa la curva secuencial de absorción.

Tabla 6. Porcentaje de absorción de áridos reciclados

Tiempo (horas)	**% de Absorción**	
	Grueso (4-12 mm)	**Fino (0-2 mm)**
0	0	0
0.5	4,48	3,12
1	3,63	11,04
1.5	3,87	9,75
2	4,23	8,38
18	5,33	7,50
20	7,23	8,23
24	6,25	8,4

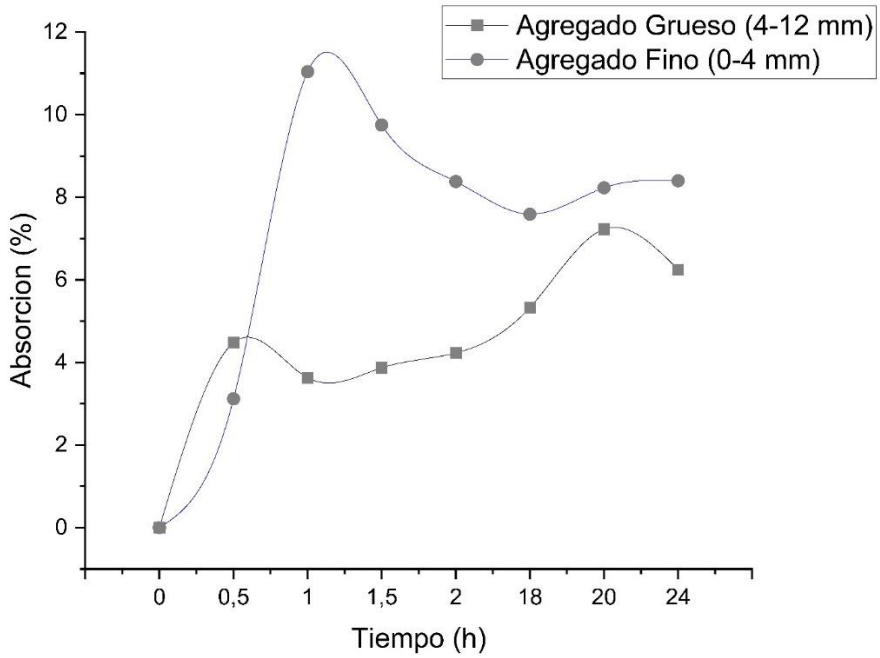


Ilustración 22. Curva de absorción de Áridos Reciclados de Hormigón – ARH

Como conclusión de este ensayo se puede decir que el árido reciclado grueso llego a su punto de saturación una vez transcurridas las 20 horas, mientras que el árido reciclado fino se saturo por completo a una hora y esto se debe porque en las prestaciones suministradas por la empresa Hercal la descripción del mismo material dice arena reciclada lavada 0/2mm y cuenta con un porcentaje de absorción del 10%, lo que es alto y esto quiere decir que el material por lo general está saturado. Se adjunta ficha técnica de prestaciones en Anejos.

3.3.3.1.3 Contenido de Humedad del Esqueleto Granular Reciclado

Por otro lado, se realiza también el ensayo de contenido de humedad de los áridos reciclados, el cual sigue un proceso que se describe a continuación. Se pesaron los mismo áridos para medir la saturación, estos fueron llevados al horno a una temperatura de 105˚ por 24 horas. Para el caso del árido grueso su peso fue de 564,6 gramos incluidos el recipiente y, por otro lado, el peso del árido fino fue de 1001,8 gramos con el recipiente, estos valores fueron aleatorios. (Véase la Ilustración 23)

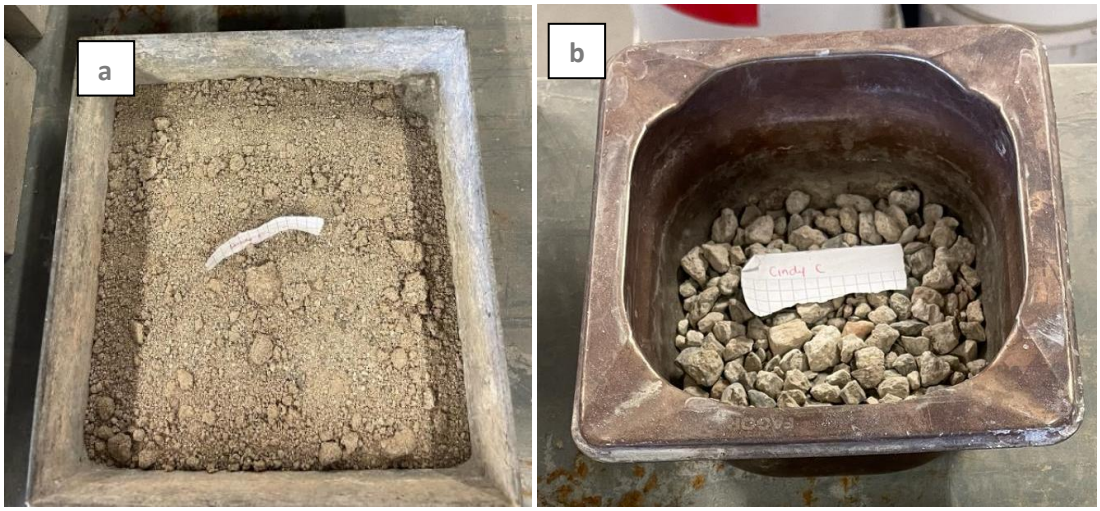


Ilustración 23. Muestras de áridos reciclados secas a 24 horas a) árido reciclado fino, b) árido reciclado grueso

En la Tabla 7 se muestra el porcentaje de contenido de humedad de cada árido, valores que servirán al momento de la dosificación donde estos intervengan ya que es un porcentaje de agua que deberá ser tomado en cuenta para la corrección del agua nominal.

Tabla 7. Tabla de contenido de humedad en áridos

Contenido de Humedad			
Árido Grueso Reciclado		**Árido Fino Reciclado**	
Parcialmente Saturados	500,00	**Parcialmente Saturados**	310,00
Secos	479,10	**Secos**	256,00
% de Humedad	**4,18%**	**% de Humedad**	**17,42%**

3.4 DOSIFICACIONES Y PROCESO DE FABRICACIÓN

Con el objetivo de estudiar la influencia de los subproductos industriales señalados en el apartado 3.3 se realizaron las dosificaciones con sus respectivas sustituciones. De este modo que se abarca las diferentes causas y análisis correctos que se puedan observar o influir a la resistencia a compresión y estado fresco debido a su empleo.

Se fabricaron 4 confecciones diferentes, denominándoles a partir de ahora de la siguiente manera para un mejor control y entendimiento a lo largo del documento.

1. Dosificación de HRef
2. Dosificación HL
3. Dosificación HE
4. Dosificación HAR

Teniendo presente que la cuarta dosificación es la de referencia que se indicó en la Tabla 3, pero con diferente fabricante de cemento por lo que se realizó la dosificación para igualar todos los materiales y poder comparar.

Cada dosificación tiene su porcentaje de sustitución, las dos primeras para el cemento y la última una sustitución total de áridos, se manejan con el mismo material todas, siendo así, se tiene que tener en cuenta que el contenido de superplastificante fue modificado en la fabricación con el objetivo de cumplir un hormigón autocompactable.

La relación de agua/cemento como lo indica el Código Estructural en el capítulo 7 apartado 37.3.2, según la clase de exposición y cantidad mínima del cemento no debe pasar de a/c 0,65, lo que cumple con todas las dosificaciones fabricadas, puesto que para todas las dosificaciones se trabajó con una relación a/c de 0,53; se tuvo en cuenta en la mezcla de áridos reciclados una pre-saturación para que esta no fuese modificada.

Para un hormigón autocompactante también es imprescindible el contenido de finos para que exista tal fluidez como la indican los requerimientos, para este porcentaje nos basamos en lo señalado en el Anejo 17 “Recomendaciones para uso de hormigón autocompactante”, la cantidad total de finos menores a 0,125 mm que aporta el cemento, adiciones si es el caso y áridos es del orden del 23% en peso, de la masa del hormigón.

3.4.1 Hormigón con Lodos de Lavado

La presente dosificación exhibida en la Tabla 8 nos describe el tipo de hormigón, fecha de realización y el volumen que se fabricó para los ensayos necesarios. Identifica todos los materiales y cantidades respectivas que se usaron en base al volumen fabricado como hace referencia también a un volumen de 1m³, acompañado de observaciones acontecidas en la fase de fabricación.

Tabla 8. Dosificación de hormigón con sustitución de lodos de lavado 20%

HOJA DE DOSIFICACIÓN				
Hormigón	20% lodos de lavado	**Fecha**	2 de abril 2024	**Vol./ensayo m3**
Tipo de hormigón	HAC	**Identificación probeta**	HL	0,021
DISEÑO DE HORMIGÓN				
Materiales	**Cantidad – 1m³ (kg)**	**Cantidad fabricación (kg)**	**Observación**	
Cemento I 52,5R	280	5,88	80% del peso del cemento inicial	
Lodos de lavado	70	1,47	Adición al 20% del peso del cemento	
Arena 0-2	1054	22,134	-	
Grava 6-12	893	18,753	-	
Agua neta	185	3,885	-	
Chrysoxel 390	2,1	0,0441	0,6% del peso del cemento	
MasterEase 5250 superplast.	1,75	0,03675	Empezó desde 0,5% hasta 2,5% del peso del cemento	

En el proceso de fabricación de esta dosificación siguió la siguiente secuencia de amasado:

- Humectación de la mezcladora con un poco de agua y retirar el exceso.
- Se incorporó el cemento y los lodos de lavado para luego ser mezclado por 1 minuto.
- Se añadió la arena y se mezcló durante 1 minuto y así completamos toda la fracción fina.
- Incorporación de los áridos gruesos, siendo estos de granulometría 6 – 12 mm.
- Amasado por 1 minuto por cronometro en la mezcladora.
- Antes de agregar el agua, para homogeneizar los áridos y el resto de materiales se dejó amasar por 30 segundos.
- Se adiciona el 85% del agua, dejando el 15% restante para mezclar con el superplastificante.
- Mezclado por 5 minuto más.
- Al transcurrir el primer minuto y medio de mezcla, se agrega el superplastificante con el agua faltante.

- Al observar que la mezcla no está del todo fluida, se procede a aumentar la cantidad del superplastificante hasta llegar al 2,5%.
- Y en los últimos 30 segundos se vierte el acelerante.
- Se finaliza el amasado y da paso a los ensayos en hormigón fresco.

La siguiente ilustración da paso a conocer un poco sobre este proceso de amasado. (Véase Ilustración 24)

Ilustración 24. Proceso de fabricación con lodos de lavado a) adición de lodos, b) mezclado, c) mezcla final.

Si se recalcula la cantidad de superplastificante en peso que se utilizó en este amasado en unidad de volumen, el valor final con un 2% de aditivo superplastificante para lograr autocompactibilidad, seria: 0,147 kg.

3.4.2 Hormigón con Escoria

La siguiente confección mostrada en la Tabla 9 nos describe el tipo de hormigón, fecha de fabricación y volumen que se elaboró para los ensayos necesarios. Identifica todos los materiales y cantidades respectivas que se usaron en base al volumen fabricado y por 1m³ también.

En base a lo ocurrido a la corrección elevada del aditivo en la Tabla 8. Dosificación de hormigón con sustitución de lodos de lavado 20% se decidió empezar con un porcentaje de superplastificante del 1,5% para no ver afectado el tiempo de amasado y evitar la manipulación en repetidas ocasiones, sin embargo, se observó que este porcentaje provoco segregación y exudación en el hormigón pudiendo afectar otras propiedades con el paso del tiempo.

Tabla 9. Dosificación de hormigón con sustitución de escoria ED-FR4-CuD 20%

HOJA DE DOSIFICACIÓN				
Hormigón	20% escoria D reduida	**Fecha**	3 de abril 2024	**Vol./ensayo m3**
Tipo de hormigón	HAC	**Identificación probeta**	HE	0,021
DISEÑO DE HORMIGÓN				
Materiales	**Cantidad 1m^3 (kg)**	**Cantidad de fabricación (kg)**	**Observación**	
Cemento I 52,5R	280	5,88		
Escoria ED-FR4-CuD	70	1,47	Adición al 20% del peso del cemento	
Arena 0-2	1054	22,134		
Grava 6-12	893	18,753		
Agua neta (l)	185	3,885		
Chrysoxel 390	2,1	0,0441	0,6% del peso del cemento	
MasterEase 5250 superplast.	5,25	0,11025	Empezó con el 1,5% del peso del cemento	

El proceso de amasado de esta dosificación siguió la siguiente secuencia:

- Humectación de la mezcladora con un poco de agua y retirar el exceso.
- Se incorporó los áridos en primero lugar para ser mezclados por 1 minuto.
- Se añadió el cemento y la escoria, se mezcló durante 1 minuto. Se intercambiaron los dos primeros pasos en comparación al primer proceso debido que se impregnaba mucho el material fino en la mezcladora.
- Por 1.5 minutos se dejó amasando los pasos anteriores para homogeneidad de la mezcla.
- Se verte agua a un 80% de su peso total y se amasa por 1 minuto más.
- Se mezcla de nuevo por 2 minutos mientras se agrega el 1.5% de aditivo superplastificante al transcurrir 30 segundos.
- Poco a poco se termina de agregar el agua faltante a la mezcla mientras se sigue mezclando.
- Antes de finalizar, se deja mezclar por 2 minutos más.
- Se agrega el acelerante como último paso cuando hayan pasado 30 segundos.
- Se finaliza el amasado y da paso a los ensayos en hormigón fresco.

Ilustración 25. Proceso de fabricación con escoria ED-FR4-CuD a) materiales a emplear, b) mezclado, c) mezcla final.

3.4.3 Hormigón con Áridos Reciclados

La siguiente confección mostrada en la Tabla 10 sigue el mismo formato de las hojas de dosificaciones de los apartados anteriores, pero en este caso también existe la presencia de un filler que reemplazará una parte del árido fino porque este no cumple con el porcentaje requerido para ser autocompactable.

Es por esto que, se realizó el ensayo de granulometría a los áridos reciclados de hormigón para comprobar su contenido de finos como se señaló en el apartado 2.3.2.1.1, quedando así, que por cada kg de árido fino en la mezcla se reemplaza 105,75 gr de filler y este resultado mermarlo al árido fino para compensar.

El filler utilizado fue el existente en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad Politécnica de Catalunya; se adjunta ficha técnica en Anejos.

El contenido de superplastificante una vez más se elevó a 2,25%, no obstante, la mezcla resultó muy pastosa y no fluida lo que significó, el no cumplimiento de ciertos ensayos para generar autocompactibilidad.

Tabla 10. Dosificación de hormigón con 100% de áridos reciclados

HOJA DE DOSIFICACIÓN				
Hormigón	Áridos Reciclados	**Fecha**	15 de abril 2024	**Vol./ensayo m3**
Tipo de hormigón	HAC	**Identificación probeta**	HAR	0,025
DISEÑO DE HORMIGÓN				
Materiales	**Cantidad - 1m^3 (kg)**	**Cantidad de fabricación (kg)**	**Observación**	
Cemento I 52,5R	350	8,75		
Filler por falta de finos	105,75	3,04	se añade filler por falta de finos	
Árido fino reciclado 0/2	948,25	23,3	se restan los 3,04 kg de filler	
Árido grueso reciclado 6/12	893	22,325	áridos reciclados de hormigón	
Agua neta (l)	185	4,625		
Chrysoxel 390	2,1	0,0525	0,6% del peso del cemento	
MasterEase 5250 superplast.	1,75	0,04375	se empieza con 1% del peso del cemento hasta 2,25%	

El proceso de amasado de esta dosificación es igual a las amasadas anteriores y se detalla de la siguiente manera:

- Humectación de la mezcladora con un poco de agua y retirar el exceso.
- Se incorporó los áridos en primero lugar para ser mezclados por 2 minutos.
- Se añadió el filler y cemento, se mezcló durante 2.5 minutos para homogenizar la mezcla.
- Se verte agua a un 80% de su peso total y se amasa por 1 minuto más.
- Se mezcla de nuevo por 2 minutos mientras se agrega el 1,5% de aditivo superplastificante al transcurrir 30 segundos.
- Se corrige el valor del superplastificante agregándole 0,5% más hasta la cantidad indicada en la dosificación, y el agua faltante mientras se continúa mezclando por 3 minutos.

- Antes de finalizar, se deja mezclar por 2 minutos más.
- Se agrega el acelerante como último paso cuando hayan pasado 30 segundos.
- Se finaliza el amasado y da paso a los ensayos en hormigón fresco.

Ilustración 26. Fabricación de hormigón con áridos reciclados a) materiales a utilizar, b) mezcla final.

3.4.4 Hormigón de Referencia

El diseño de esta dosificación fue proporcionado por la constructora Hormipresa que sirvió de referencia para la comparación del resto de las confecciones. El único cambio que se produjo fue la del cemento a pesar de ser de la misma resistencia establecida, pero diferente fabricante. La dosificación de referencia es la siguiente, véase la Tabla 11.

Tabla 11. Dosificación de hormigón de referencia

HOJA DE DOSIFICACIÔN				
Hormigón	Referencia	**Fecha**	3 de abril 2024	**Vol./ensayo m3**
Tipo de hormigón	HAC	**Identificación probeta**	HRef	0,021
DISEÑO DE HORMIGÓN				
Materiales	**Cantidad 1m3 (kg)**	**Cantidad de fabricación (kg)**	**Observación**	
Cemento I 52,5r	350	7,35		
Arena 0-2	1054	22,134		
Grava 6-12	893	18,753		
Agua neta (l)	185	3,885		
Chrysoxel 390 aditivo	2,1	0,0441	0,6% del peso del cemento	
MasterEase 5250 superplast.	1,75	0,03675	Empezó con 0,5% del peso del cemento y terminó con 1,25%	

La confección de esta mezcla se realizó en base a una dosificación tradicional, de la siguiente manera:

- En primer lugar, se amasaron los áridos naturales por 1 minuto en la mezcladora que se humedeció previamente.
- Se agrega cemento por 1.5 minutos
- El agua es añadida en un 80% y se deja mezclar por 1 minuto.
- Se procede a mezclar por 2 minutos más y mientras estos transcurren, se agrega el superplastificante a los 30 segundos así este logra mezclarse de mejor manera en el tiempo restante. El aditivo se agrega con un porcentaje del agua restante.
- Al ver que aún no logra la consistencia correcta, se agrega el un 0,75% más del aditivo y se mezcla por 1 minuto.
- Se vuelve a mezclar por 2 minutos mientras se agrega el acelerante y el faltante de agua.
- Se finaliza el amasado y da paso a los ensayos en hormigón fresco.

Ilustración 27. Finalización de amasado de hormigón referencia

3.5 PROPIEDADES DEL HORMIGÓN

3.5.1 Propiedades en Estado Fresco

La principal propiedad que se persigue en el presente proyecto es la autocompactibilidad y las características que deben cumplirse simultáneamente para obtenerla son: capacidad de relleno, resistencia a la segregación y resistencia al bloqueo.

La capacidad de relleno consiste en que la mezcla debe fluir y rellenar un encofrado por la acción de su propio peso, sin necesidad de vibración externa.

El hormigón autocompactante tiene que mantenerse homogéneo, en otras palabras, sus componentes no pueden separarse en la mezcla, ni existir exudación del agua. Esta propiedad esta de la mano de la viscosidad del hormigón.

Por último, la resistencia al bloqueo se refiere a la no obstrucción de las armaduras existentes cuando este en curso, por el contrario, que pueda pasar por medio de ellas sin problema alguno, es por eso que los tamaños de áridos no son tan grandes.

Para la comprobación de estas propiedades mencionadas, se realizaron al menos dos ensayos en función de la normativa prescrita según corresponda para poder hablar de un hormigón autocompactante.

3.5.1.1 Ensayo de Escurrimiento

También conocido como “slump-flow” en inglés. El ensayo en mención resulta uno de los más sencillos y utilizados por su rápida ejecución y se puede realizar en obra y en laboratorio. Permite conocer la fluidez y velocidad del hormigón, además, se logra visualizar si existe o no segregación o exudación del mismo al momento de ensayar.

Este ensayo esta normalizado por la norma EN 12350-8:2010. Los materiales que se emplean son: placa metálica plana donde este marcado 2 circunferencias esenciales, una de 200 mm y otra de 500 mm, cono de Abrams, flexómetro.

El procedimiento del ensayo consiste en apoyar el cono guiándose con la primera circunferencia de 200 mm, se llena, se enrasa y luego se alza, desde que el cono es alzado se toma el tiempo con cronómetro hasta llegar a la segunda circunferencia de 500 mm, se define el T_{50}. Una vez que el hormigón haya dejado de moverse, se mide con el flexómetro el diámetro mayor extendido y el diámetro perpendicular a éste y la media es el escurrimiento.

Ilustración 28. Montaje de ensayo de escurrimiento

El objetivo de este ensayo es que en la extensión se logre ver una distribución homogénea de los áridos y el tiempo en que tarde en formarse esta extensión sea el regido por la norma. Los valores reglamentados son:

Tabla 12. Requisitos generales para autocompactibilidad

Ensayo	Parámetro medido	Rango admisible
Escurrimiento	T_{50}	$T_{50} \leq 8$ seg
	D_f	550 mm $\leq D_f \leq$ 850 mm

A pesar de que en el hormigón convencional exista un ensayo donde se utilice de igual manera el cono de Abrams, estos se diferencian principalmente porque el asentamiento no constituye una medida representativa, más bien es la extensión y el tiempo en llegar a una de las circunferencias lo que nos interesa, así medir la fluidez que un hormigón autocompactante requiere.

Para las todas dosificaciones mencionadas en el apartado 3.4 se realizó este ensayo a medida que se iba fabricando el hormigón para efectuar el cumplimiento de la primera prestación. Se muestran algunas fotos del proceso al ensayar. Ilustración 29.

Ilustración 29. Proceso de ensayo de escurrimiento

En las siguientes 3 ilustraciones se puede observar el llenado del cono de Abrams con el hormigón en este caso fue de la dosificación de lodos de lavado u hormigón residual, al terminar, se enraso y se retiró el cono, tal como dice la norma, sin obstrucción alguna. Seguido de esta, se muestra la extensión formada por la misma confección en la que se logra ver la distribución homogénea, lo que quiere decir, que, a simple vista, el ensayo ha sido validado. Por último, se muestra la extensión medida con flexómetro de la dosificación de referencia, la

misma que resulta similar a la anterior por lo que de la misma forma se puede decir que está dentro de los parámetros normados.

3.5.1.2 Ensayo Embudo en V

Conocido en inglés como V-funnel. Estudios experimentales manifiestan que la reducción de sección al ser un embudo provocaría un riesgo de bloqueo por el contacto de los áridos gruesos, y esto nos podría dar indicios de falta de viscosidad (Bravo Sobrino, 2004). Por lo tanto, el ensayo nos permite conocer la viscosidad plástica del material, además, de la capacidad de relleno.

El equipo requerido es: embudo en V, recipiente, cronómetro y barra para enrasar, se muestran los componentes en mención a continuación.

Ilustración 30. Montaje para ensayo embudo en V

Siguiendo la norma EN 12350-9:2011, el procedimiento el embudo en este caso metálico, se coloca siendo sostenido por un soporte de igual material y ubicando en la parte de abajo un recipiente que recibirá el hormigón.

Como primero paso, se humedece todo el embudo en su superficie interior, se asegura que la compuerta este cerrada y se procede a verter el hormigón hasta que llegue a la abertura superior para después enrasarlo. Se deja esperar 10 segundos, se abre la compuerta y desde ese momento se empieza a cronometrar para obtener el tiempo de vaciado. El tiempo

T_v corresponde al tiempo desde que se abre la compuerta hasta que se logra ver el recipiente a través del embudo verticalmente y que además bajo la normativa en mención oscila entre 4 y 20 segundos. Este valor, es el tiempo de flujo. No puede existir bloqueo alguno, de lo contrario el ensayo se debe repetir.

Este proceso se repitió para las 4 confecciones mencionadas, se muestra a continuación un poco del proceso antes descrito.

Ilustración 31. Proceso de ensayo embudo en V

Las imágenes mostradas en la Ilustración 31 se observa el proceso que se siguió para la ejecución de este ensayo, por un lado, tenemos el hormigón siendo vertido en el interior del

embudo hasta llegar a su abertura superior y por el otro, la compuerta abierta y la mezcla saliendo por la parte inferior para obtener el valor T_v .

Como en el Anejo 17 del Código Estructural está descrito, existen tipologías o clases para estos hormigones que pueden aplicarse gracias a los resultados de los ensayos anteriormente descritos. Se muestran tablas recogidas de este Anejo.

Tabla 13. Clases de escurrimiento

Clase	Criterio, según UNE 83.361
AC-E1	550 mm < d_f ≤ 650 mm
AC-E2	650 mm < d_f ≤ 750 mm
AC-E3	750 mm < d_f ≤ 850 mm

Tabla 14. Clases de viscosidad

Clase	Criterio por ensayo de escurrimiento UNE 83.361	Criterio alternativo por ensayo embudo en V UNE 83.364
AC-V1	2,5 seg < T_{50} < 8 seg	10 seg ≤ T_V ≤ 20 seg
AC-V2	2 seg < T_{50} < 8 seg	6 seg ≤ T_V ≤ 10 seg
AC-V3	T_{50} ≤ 2 seg	4 seg ≤ T_V ≤ 6 seg

3.5.2 Propiedades en Estado Endurecido

3.5.2.1 Resistencia a Compresión

Mientras que las propiedades del hormigón autocompactante difieren un poco de las del estado fresco, las propiedades en hormigón endurecido se pueden tratar de igual manera como las de un hormigón convencional. Según el artículo 39 del Código Estructural, en cuanto a sus edades tempranas estas podrían producir alguna variación o retracción en el tiempo de fraguado, por motivo del contenido de finos, al igual que aditivos superiores al convencional.

De la misma forma que esta característica es transcendental en el hormigón convencional, representa la misma importancia en esta tipología de hormigón a pesar que su configuración varía un poco por diversos factores: tamaño máximo de partículas, mayor

contenido de finos, lo que se traduce, a una pasta más densa, de hecho, se suele señalar que el hormigón autocompactante se divide en 2 etapas: pasta-árido, otro factor que varía es, la ausencia de vibración, que influye debido a su ausencia en el hormigón autocompactante, por el contrario, si esta no existiera en un hormigón convencional genera porosidad o lo comúnmente conocido como "ratoneras", que evidentemente provoca una pérdida de resistencia.

Bajo normativa UNE-EN 12390-1:2022 y sus diferentes apartados nos permite a conocer a fondo todo el proceso, material y restricciones posibles para obtener un resultado correcto de este ensayo a compresión. Por un lado, en la parte 1, explica las formas y tolerancias que se deben considerar de las probetas seleccionadas, que en este caso son de forma cilíndrica con un diámetro y altura de 10 y 20 cm respectivamente. Las tolerancias descritas tanto para altura como diámetro de un molde son del 0,5%. Ilustración 32

Ilustración 32. Probetas cilíndricas para ensayo a compresión

Además, en la parte 2, nos habla del vaciado del hormigón en las probetas cilíndricas previamente ya que se debe colocar un desencofrante o aceite que facilite su extracción y no se adhiera. Dependiendo del hormigón fabricado y su método de compactación este debe ser realizado correctamente, para este caso, el hormigón autocompactante solo se vierte y se enrasa, en el caso del hormigón autocompactante se debe rellenar en una sola capa.

El curado de las probetas se basa en un lugar de almacenamiento en el que puedan permanecer sin afectación alguna hasta el día en que se pretenden ensayar. La cámara de curado debe estar a una temperatura aproximada 20 ± 2˚ y una humedad relativa de ≥ 95%.

Ilustración 33. a) Probetas en proceso de ensayo y b) ubicadas en cámara húmeda de LATEM.

La norma UNE-EN 12390-3:2020 *"Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas",* expresa que el ensayo consiste en comprimir las probetas fabricadas en una máquina a compresión, registrándose la máxima carga alcanzada por la probeta y luego se calcula la resistencia a compresión.

El equipo requerido para este ensayo fueron probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, y se ensayaron a las siguientes edades: 1 día, 3 días, 7 días y 28 días; por normativa se ensayan 3 probetas por día señaladas con las diferentes asignaciones dependiendo edades y dosificación; su curado hasta día de ensayo fue realizado en una cámara al 90% de humedad.

Ilustración 34. Equipo utilizado para ensayo resistencia a compresión – IBERTEST MEH 3000

CAPITULO IV ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 RESULTADOS Y ANALISIS DE LOS HORMIGONES

4.1.1 En Estado Fresco

Se presentan a continuación los resultados de los ensayos mencionados en el apartado 3.5 PROPIEDADES DEL HORMIGÓN, de las diferentes dosificaciones fabricadas. Como apreciación general se comenta que las sustituciones de cemento resultaron satisfactorias para ambos ensayos en estado fresco, mientras que se percibe una baja fluidez en la sustitución total de áridos reciclados, a pesar de, haber modificado ciertos valores para que estos cumplan.

Para el primer ensayo en estado fresco, refiriéndonos al de escurrimiento, se presenta una tabla resumen.

Tabla 15. Resumen de ensayo de escurrimiento

Tipología de hormigón	T_{50} (seg)	D_f (cm)
HR	4	64
HL	7	58
HE	4	72
HAR	-	40

Seguidamente se muestra otra tabla resumen del segundo ensayo realizado, embudo en V.

Tabla 16. Resumen de ensayo de embudo en V

Tipología de hormigón	Tiempo (seg)
HR	11
HL	23
HE	24
HAR	10

De manera gráfica se presentan los mismos ensayos a continuación.

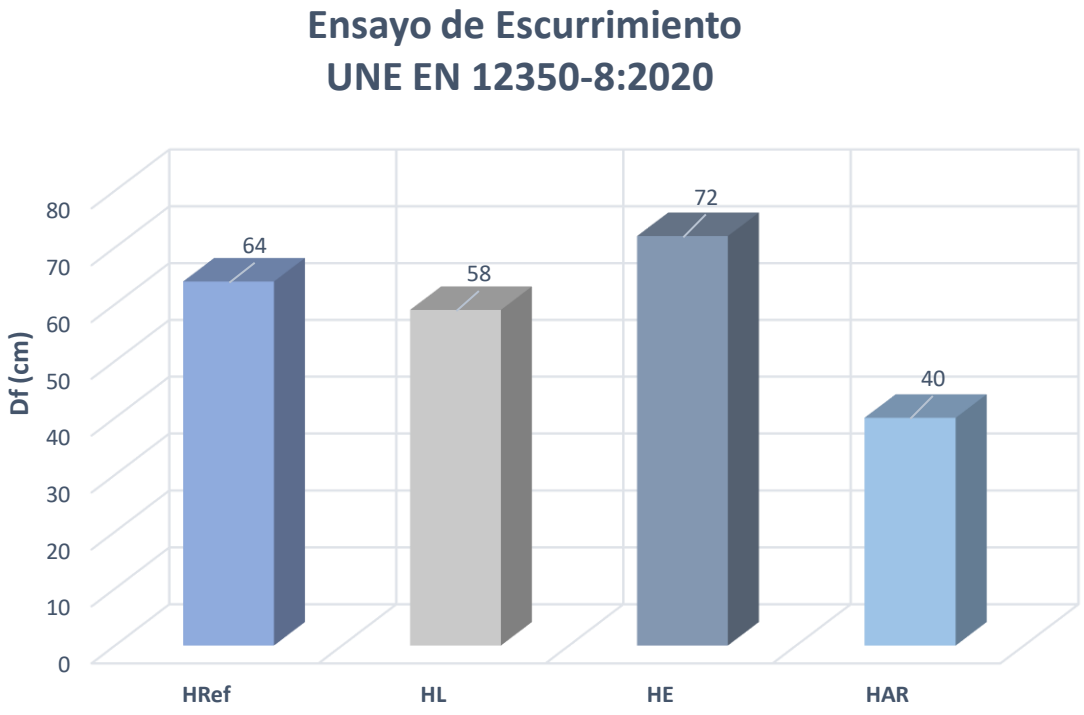


Ilustración 35. Representación gráfica del ensayo de escurrimiento

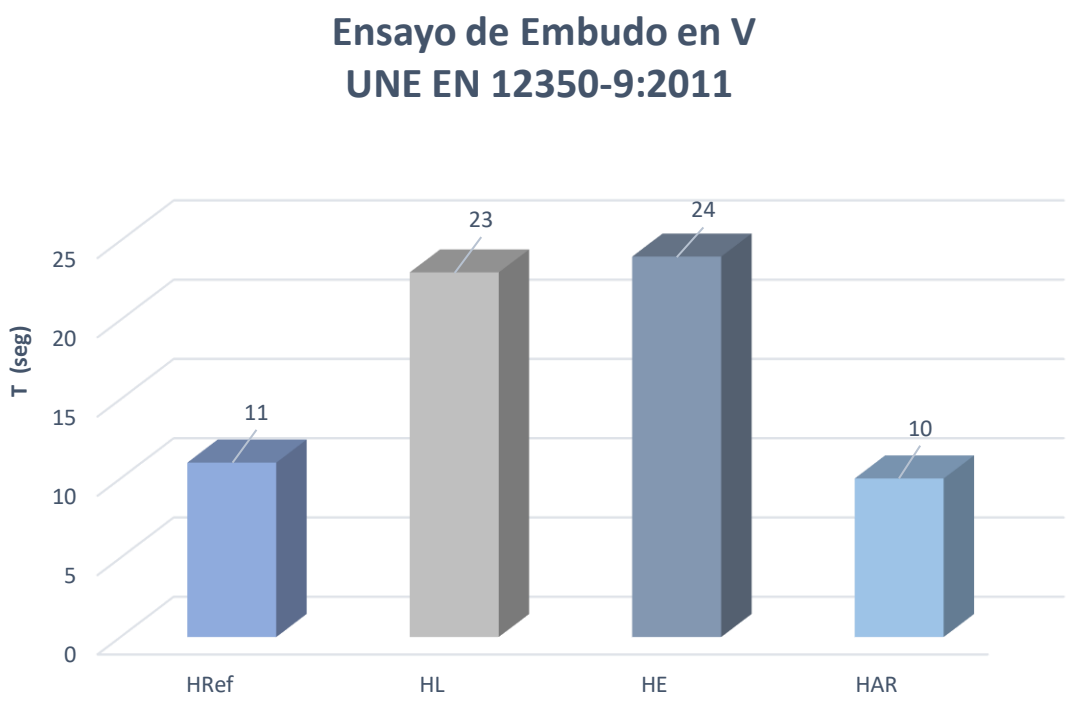


Ilustración 36. Representación gráfica del ensayo embudo en V

Las dosificaciones se basaron en la presentada por Hormipresa en la que el único cambio que se precipitó fue el fabricante del cemento, y debido a esto se realizó esa dosificación base con el cemento existente en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras y Materiales.

Para todas las mezclas se aumentó la cantidad de superplastificante, este último jugó una partida importante para ganar fluidez, se realizó este cambio porque al realizar los primeros intentos no se obtuvo el escurrimiento esperado.

Al momento de fabricar, una vez mezclados todos los componentes sin contar el acelerante se revisaba la fluidez del hormigón y en esos momentos se precisa la corrección del superplastificante añadiéndose siempre porcentajes del 0,25%, al cabo de la primera mezcla que fue la de sustituciones de lodos de lavado se alcanzó hasta un 2% de superplastificante dando esto como resultado en la extensión de la torta un valor de 58 cm que respecto al hormigón referencia está por debajo, no obstante, cumple con el rango establecido por la norma, mientras que, el valor obtenido por la mezcla de sustitución de escoria es notablemente más alto, debido a que se tomó como punto de referencia el valor de aditivo en la fabricación anterior, para esta última se estableció un valor de 1,5%, lo que produjo segregación de árido

grueso, es decir, una pasta no homogénea y exudación evidentemente porque la pasta está muy fluida a causa del porcentaje de superplastificante con la que se empezó el ensayo. Es recomendable añadirle poco a poco este aditivo para evitar estos inconvenientes. Véase la Ilustración 37 en la que se observa una aureola de pasta alrededor del perímetro de la torta.

Por último, la dosificación fabricada con sustitución total de áridos no cumplió con los requisitos de escurrimiento dando como resultado un valor inferior a la extensión de flujo exigida por la norma como se logra observar en la Ilustración 37, la extensión fue de 40 cm y se tiene una mezcla muy densa que no permite su escurrimiento, esto es debido a la cantidad reducida de finos que originalmente el árido fino reciclado contenía, a pesar de que esta resultó ser uno de los cambios realizados en la dosificación y también se debe a la gran absorción de agua con los que los áridos reciclados cuentan.

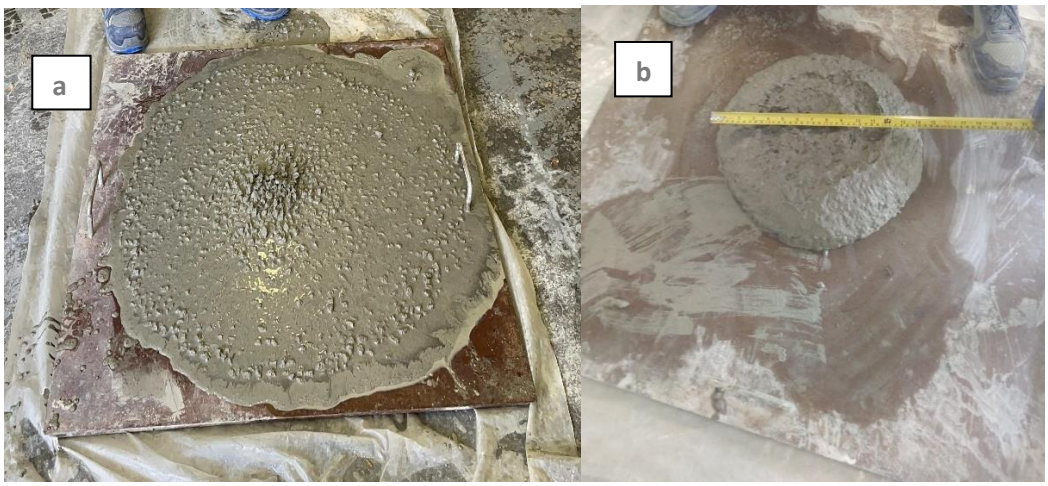


Ilustración 37. Extensión de tortas a) escorias b) áridos reciclados

Empleando también la nomenclatura utilizada en el Código Estructural respecto a la tipología de estos como se indicó en las tablas Tabla 13 y Tabla 14, 2 amasadas se logran catalogar para clases de escurrimiento como AC-E1 siendo estas identificadas como HRef y HL con 64 y 58 cm, respectivamente; también existe 1 amasada como AC-E2 correspondiente a HE con 72 cm y la última no entra en estas clases de tipología por no cumplir con los mínimos requisitos, detallada como HAR.

Así mismo, se analiza el ensayo de embudo en V de todas las confecciones, donde 2 amasadas resultaron satisfactorios para con los requisitos de la normativa, mientras que las otras 2 se alejan por pocos segundos de los rangos, una de ellas debido a la presencia de

segregación y la otra por el contenido elevado de superplastificante mezclado. De igual manera que en el escurrimiento, estas entran en una categoría según el Anejo 17, donde el hormigón de referencia por su tiempo obtenido es AC-V1, por el contrario, la mezcla de áridos reciclados es AC-V2.

4.1.2 En Estado Endurecido

Para la caracterización de la resistencia a compresión, se estudió en función del ensayo detallado en el apartado 3.5.2.1 Resistencia a Compresión para todas las confecciones descritas.

Como ya se mencionó, las probetas empleadas fueron cilíndricas de dimensiones 10x20 cm, por dosificación se ensayaron 12 probetas en total a 4 edades diferentes, es decir, 3 cilindros por cada edad minimamente como lo indica la norma.

En la siguiente tabla a ilustrarse se mostrará un resumen de resistencias medias a compresión obtenidas gracias al promedio de las 3 probetas por cada edad hasta los 28 días y su desviacion; debido al tiempo no se logró plasmar los valores a los 28 de la última dosificación debido a la fecha de fabricación.

Tabla 17. Resumen de resistencias a compresión en edades ensayadas

Tipología	**Resistencia a compresión (MPa) (SD)**			
	1 día	**3 días**	**7 días**	**28 días**
HRef	29,47 (0,34)	27,55 (3,51)	32,45 (6,42)	52,05 (4,99)
HL	20,56 (0,07)	34,82 (0,92)	39,71 (2,74)	45,87 (0,22)
HE	18,62 (0,35)	23,72 (7,64)	37,32 (4,96)	50,93 (5,58)
HAR	13,85 (1,38)	21,58 (2,02)	25,47 (1,13)	- -

Con las resistencias citadas en la Tabla 17 se pueden analizar las influencias de las sustituciones, los aditivos, la cantidad de finos, éste último sobretodo en la ultima dosificación.

Se observa los resultados de un HRef con una tendencia creciente con el pasar del tiempo, no obstante, a pesar que existe un decrecimiento leve a la segunda edad ensayada, está dentro del rango porcentual de resistencia a compresión correspondiente a esa edad de un

hormigón autocompactante. Se alcanzan resistencias a 1 día de 29,47 MPa, llegando a un 52,05 MPa a sus 28 días, con estos valores ésta mezcla cumplió con los requisitos mecánicos expuestos en la Tabla 2, se analizan los resultados respecto a éste.

Los resultados observados en la tabla anterior reflejan en el caso de sustituciones de cemento, un HL que tiende a crecer de manera positiva en cuanto va aumentando la edad, empezando con un 20,56 MPa (70% de HRef), alcanzando un valor de 39,71 MPa a sus 7 días superando a HRef, y en cuanto a la resistenica a los 28 días se observa que alcanza los 45,87 MPa llegando así a un 88% de la resistencia requerida correspondiente a esa edad. Existe una pérdida de resistencias inicial y final del 30% y 12% respectivamente, en comparación con HRef para con los requisitos exigidos en este proyecto, el comportamiento resultó ser similar a lo descrito por (Pocius et al., 2023).

Por otra parte, en la mezcla donde intervinieron las escorias, se presenta una resistencia inicial relativamente mas baja con un valor obtenido de 18,62 MPa, equivalente a un 63% en comparación con HRef correspondiente a 1 día, alcanzando a sus 28 días un valor de 50,93 MPa (98% de HRef). Esta tendencia reflejó cierta semejanza con los resultados expresados en (Shi et al., 2008) donde se menciona que las resistencias de los hormigones que contienen escoria de cobre apartir de un nivel del 10% suelen ser mas bajas que la de un hormigón sin esta adición.

Como último análisis está la confección con áridos reciclados de hormigón, en donde se obtuvieron valores por debajo de los de referencia (HRef), sin embargo, su tendencia es creciente y la perdida obtenida esta en 20-25% que esta dentro del rango normal, valores que resultaron similares a (Silva et al., 2015).

Se puede inturir que la pérdida de resistencia es normal por la reutilización de estos áridos como sustitución de un árido natural convencional que afecta la matriz del hormigón en temas de resistencia.

Analizando los valores obtenidos, se puede concluir que el comportamiento de los materiales (tipo adiciones) utilizados como reemplazo al cemento se comportaron de manera similar con una resistencia inicial y final cercana entre ellas, sin embargo, no cumplen con el requisito expuesto en la Tabla 2 en cuanto se refiere a valores iniciales.

Se muestran las gráficas de resistencia a compresión (MPa) vs tiempo (días) de cada una de las dosificaciones.

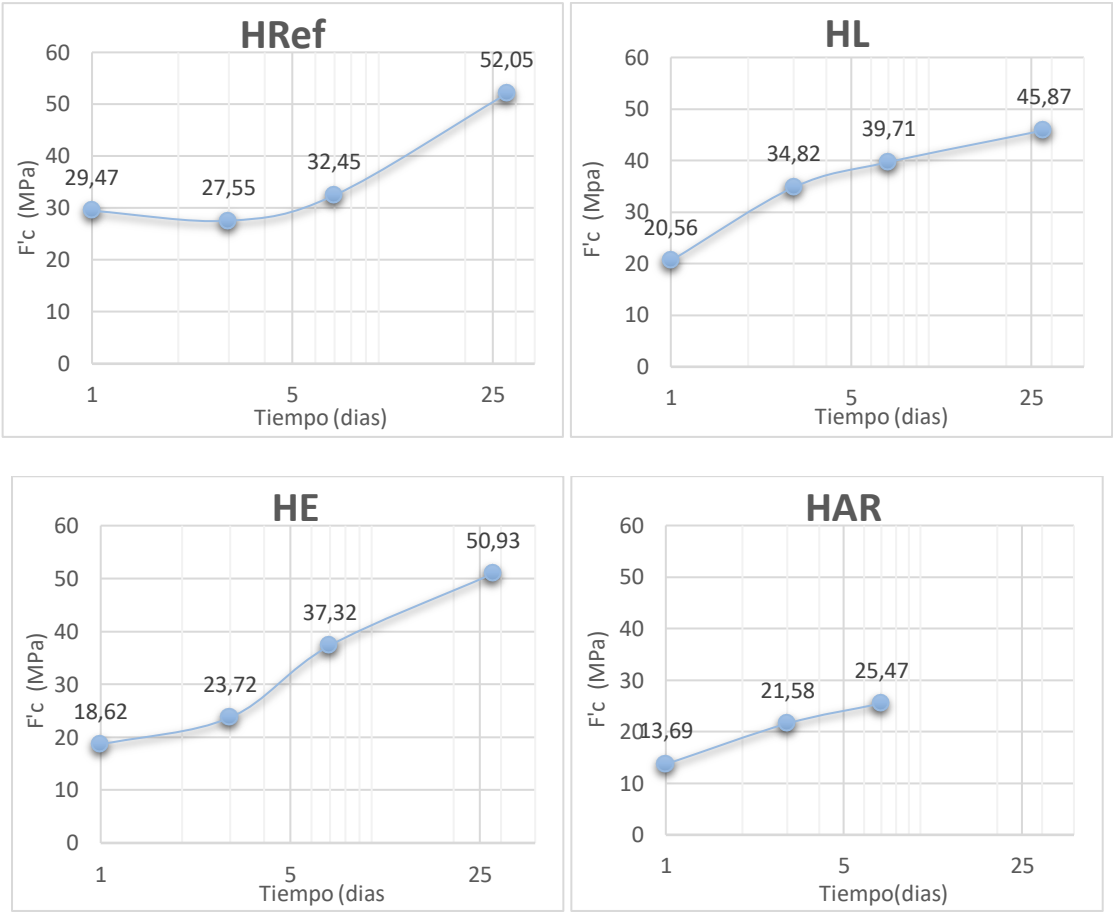


Ilustración 38. Resistencias a compresión de cada dosificación

Adicional a los resultados expuestos anteriormente, como ilustración complementaria se muestran los modos de rotura de las probetas cilíndricas sometidas al ensayo de compresión de las 4 dosificaciones fabricadas. Previo a esto, se observa en la ilustración siguiente los modos de rotura aceptados para este ensayo donde visualmente se logra comparar con la Ilustración 40.

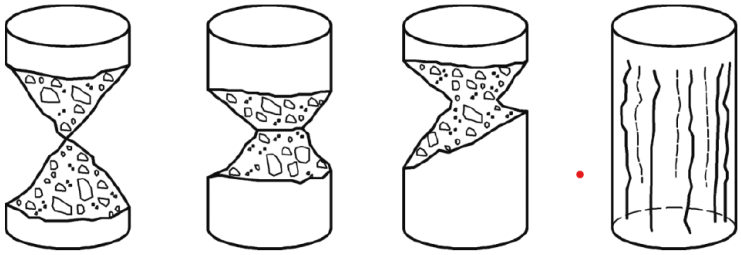


Ilustración 39. Modos de rotura en probetas cilíndricas.

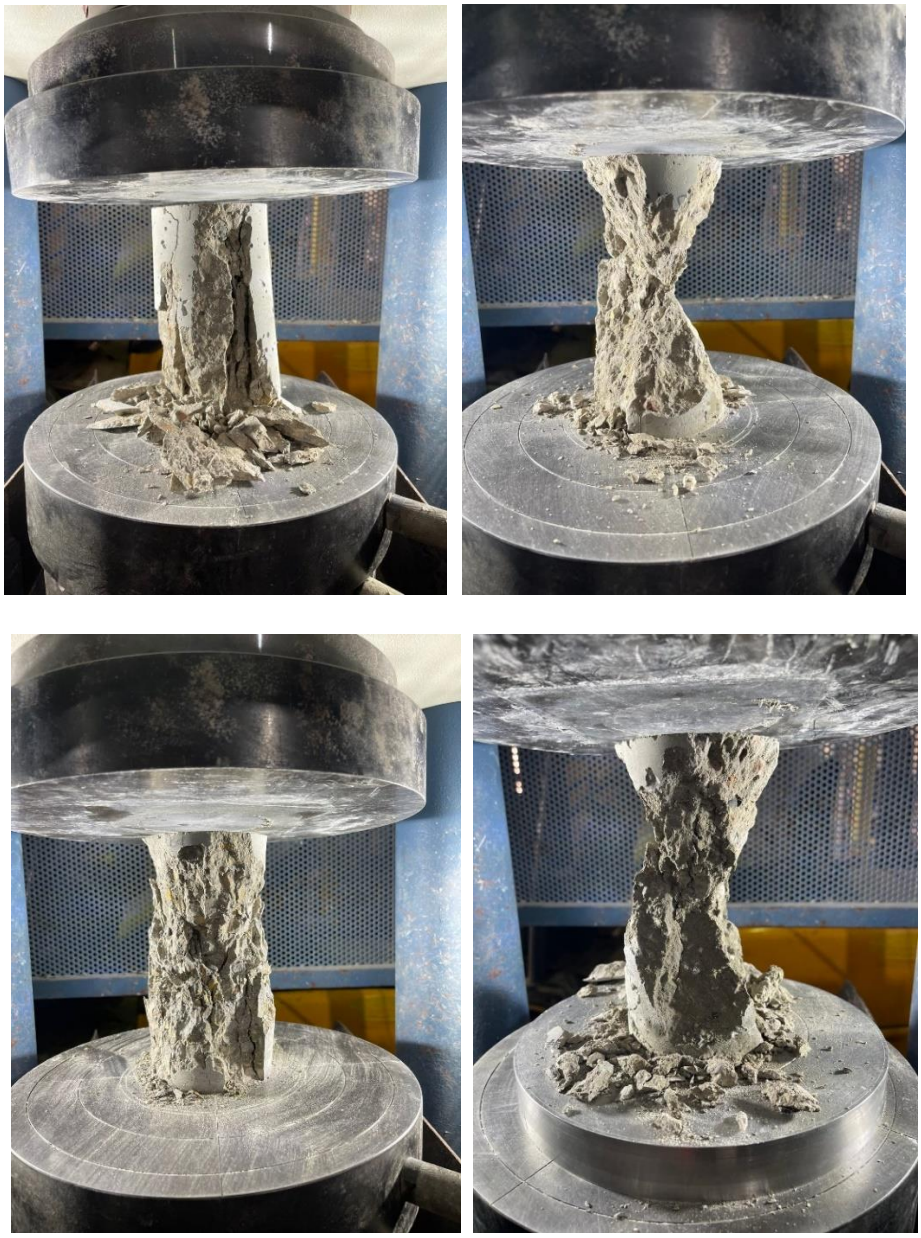


Ilustración 40. Modos de rotura de dosificaciones. a) HRef, b) HL, c) HE, d) HAR

CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES GENERALES

Se logra concluir de manera general que, a lo largo de este estudio mediante ensayos realizados con la implementación de subproductos como sustituciones en la matriz de hormigón, estos aportan diferentes características para brindar una aplicabilidad variada al hormigón.

Al tratarse de sustituciones al cemento, nos referimos a la implementación de adiciones, las mismas que proporcionan una mejor interacción con el resto de materiales, evitando una matriz más porosa y aportando una compactación mejor al hormigón. Por el contrario, al reemplazar el esqueleto granular en este caso, en su totalidad, pueden ocasionar daños en sus propiedades físicas como mecánicas que no permitan que se cumpla con el objetivo del proyecto.

Además, los subproductos empleados contribuyen al hormigón una mejor sostenibilidad para con el medio ambiente ya que son reutilizados para un nuevo fin.

5.2 CONCLUSIONES ESPECIFICAS

Como se detalló en los objetivos específicos al realizar las sustituciones del 20% del peso de cemento se obtuvieron dosificaciones HL y HE denominadas así por los materiales sustitutos, ya sea, lodos de lavado y escoria ED-FR4-CuD. Los resultados obtenidos para

ambas mezclas fueron satisfactorios para propiedades de autocompactibilidad y clasificándose según la Tabla 13 y Tabla 14, como AC-E1 y AC-V1, en ese orden, siendo estas las clases más adecuada para elementos estructurales construidos habitualmente según el Anejo 17, además de cumplir con el primero de los requisitos prestacionales mencionados en la Tabla 2, a pesar de que, en la dosificación HE existió segregación y exudación, su valor oscila dentro de lo reglamentado.

Respecto a la propiedad mecánica de las mezclas mencionadas en el párrafo anterior, los resultados para HL y HE iniciales fueron de 20.56 MPa y 18.62 MPa respectivamente a la edad de 1 día, lo que representa un 30% de pérdida aproximadamente de lo esperado, mientras tanto, la tendencia de ambas confecciones en función del tiempo es buena llegando a sus 28 días por la resistencia ganada, pero, la mezcla de mejor comportamiento a largo plazo fue la de escoria dando un 98% de la resistencia esperada.

Respecto a la sustitución total de áridos reciclados los resultados no fueron los esperados, ya que no se cumplieron ninguna de las prestaciones, no pudiendo denominarlo hormigón autocompactante, sobre todo por su ausencia de fluidez ya que por sí solo no tendrá esta habilidad, ni tendrá la capacidad de relleno necesaria para el vaciado en cualquier elemento estructural.

De igual manera sus resistencias mecánicas características a diferentes edades están aún más por debajo de las mencionadas anteriormente, por ejemplo, el valor alcanzado a 1 día corresponde a 13,85 MPa, lo que refleja una pérdida de aproximadamente un 50% respecto al HRef, a pesar de que esta línea de tendencia va en orden ascendente se aleja mucho del valor esperado y requerido para este uso en particular, por lo que se concluye que una sustitución total no es válida, sin embargo, considerar una mezcla con sustituciones independientes con respecto a los áridos y también con menor porcentaje de reemplazo sería lo ideal.

5.3 RECOMENDACIONES

Si bien es cierto se lograron analizar sustituciones con subproductos industriales para la confección de un hormigón autocompactante de ciertas prestaciones dando como resultados los expuestos en capitulos anteriores.

A pesar, del tiempo y limitados ensayos se considera que se debe experimentar progresivamente a partir de este proyecto para mejorar sus confecciones en cuanto a porcentaje

de sustitucion y cantidades empleadas respecto a los aditivos sin afectar o causar fenomenos en el hormigón.

Se recomienda analizar de manera exhaustiva atraves de ensayos de laboratorio mas propiedades que se obtienen gracias a estas dosificaciones para alcanzar una mejor caracterizacion.

Tambien, ampliar las vias de aplicabilidad, es decir, en este proyecto nos enfocamos a que la tipologia del hormigón sea autocompactable.

Incluso se recomienda que para la confección de áridos reciclados con una sustitucion del 100% se trabaje de manera independiente el reemplazo de cada tamano de arido ya que como bien se sabe, por ser tratados de manera diferente y provenientes de una demolicion baja la calidad del material.

5.4 FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION

A pesar del avance con este estudio queda mucha informacion y ensayos que realizar para un buen desarrollo del hormigón en base a estos materiales utilizados.

Ademas, una de las implementaciones interesantes, es la insercion de fibras de cualquier tipo o recicladas una vez procesadas pretendiendo lograr un hormigón con una aplicabilidad diferente y caracterizado complementandose con unas de las sustituciones estudiadas.

Determinar el calculo de huella de carbono de este hormigón seria fundamental para su posterior analisis en el campo ambiental que es lo que pretende mejorar la industria de la construccion.

CAPITULO VI REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahmad, M. (2022). *Caracterización experimental de hormigones reforzados con fibras sintéticas sometidos a procesos de multi-reciclado* [Bachelor thesis, Universitat Politècnica de Catalunya]. https://upcommons.upc.edu/handle/2117/372515

Álvarez González, J. L. (2014). *Hormigón autocompactante con nano adiciones y fibras* [Masters, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM)]. https://oa.upm.es/35549/

Bravo Sobrino, M. (2004). *Caracterización y utilización del hormigón autocompactable*. https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3358

Chryso. (2011, febrero 8). *CHRYSO®Xel 390*. https://www.chryso.es/p/6569/chryso-xel-390

Fiol Olivan, F. (2016). *Estudio experimental sobre propiedades mecánicas y de durabilidad de hormigones estructurales autocompactantes con áridos reciclados y su aplicación a la prefabricación*. https://doi.org/10.36443/10259/5380

Goh, C.-C., Show, K.-Y., & Cheong, H.-K. (2003). Municipal Solid Waste Fly Ash as a Blended Cement Material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *15*(6), 513-523. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:6(513)

González Arias, E. (2012). *Nueva técnica de dosificación de hormigones reciclados: Método del volumen de mortero equivalente* [Master thesis, Universitat Politècnica de Catalunya]. https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/15774

González-Fonteboa, B., & Abella, F. (2005). Recycled aggregates concrete: Aggregate and mix properties. *Materiales de Construccion*, *55*.

Haro, P. (2020, diciembre 21). PLAN CRECIMIENTA 20·30 | Recuperación de la industria del cemento. *Oficemen*. https://www.oficemen.com/sostenibilidad/hacia-la-neutralidad-climatica-en-2050/

kraljevich, F. (2020, noviembre 19). Áridos reciclados de residuos de la construcción: Hacia una economía circular del hormigón. *Hormigón al Día*. https://hormigonaldia.ich.cl/entrevista/aridos-reciclados-de-residuos-de-la-construccion-hacia-una-economia-circular-del-hormigon/

Leon, C. (2007). *PAIS VASCO: 72 NAVARRA: 49*.

Martins, J. V., Garcia, D. C. S., Aguilar, M. T. P., & dos Santos, W. J. (2021). Influence of replacing Portland cement with three different concrete sludge wastes. *Construction and Building Materials*, *303*, 124519. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124519

Master Builders. (2023, septiembre 28). *MasterEase 5025 | Aditivo superplastificante / reductor de agua de alta actividad para la producción de hormigones*. España. https://www.master-builders-solutions.com/es-es/productos/masterease/masterease-5025

Nazer, A., Honores, A., Chulak, P., Pavez, O., Nazer, A., Honores, A., Chulak, P., & Pavez, O. (2019). HORMIGÓN SUSTENTABLE BASADO EN FIBRAS DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO. *Revista internacional de contaminación ambiental*, *35*(3), 723-729. https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.03.17

Nazer, A., Pavez, O., Rojas, F., & Aguilar, C. (2010). *UNA REVISIÓN DE LOS USOS DE LAS ESCORIAS DE COBRE*. https://doi.org/10.13140/2.1.3740.0328

Nieto Alcolea, D. (2015). *Estudio de hormigón autocompactante con árido reciclado* [Phd, E.T.S.I Civil (UPM)]. https://oa.upm.es/38871/

Pocius, E., Nagrockienė, D., & Pundienė, I. (2023). The Influence of Concrete Sludge from Residual Concrete on Fresh and Hardened Cement Paste Properties. *Materials*, *16*(6), Article 6. https://doi.org/10.3390/ma16062531

Robas, A. H. (2009). *Influencia de la variación de las propiedades del árido reciclado en el hormigón endurecido*. https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/8508

Rúa-Suárez, A. F., Carvajal-Jaramillo, J., Lasso-Cerón, C. A., & Arbeláez-Pérez, O. F. (2022). Producción de hormigón verde a partir de ceniza de cascarilla de arroz y residuos de vidrio como sustitutos del cemento. *Ion (Bucaramanga, Colombia)*, *35*(2), 101-110. https://doi.org/10.18273/revion.v35n2-2022008

Sánchez de Juan, M. (2004). *Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural* [Phd, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM)]. https://oa.upm.es/381/

Sánchez Pérez, J. L., González García, M. de las N., Prieto Barrio, M. I., & García López de la Osa, G. (2019). Estudio reológico experimental de un hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero = Experimental rheological study of a self-compacting concrete reinforced with steel fibers. *Anales de Edificación*, *5*(2), Article 2.

Shi, C., Meyer, C., & Behnood, A. (2008). Utilization of copper slag in cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, *52*(10), 1115-1120. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.06.008

Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2015). The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: A review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, *19*(7), 825-849. https://doi.org/10.1080/19648189.2014.974831

Skibsted, J., & Snellings, R. (2019). Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends. *Cement and Concrete Research*, *124*, 105799. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105799

Tejedor Montagud, J. (2019). *La necesidad de nuevos hormigones para una construcción más sostenible: Los geopolímeros* [Proyecto/Trabajo fin de carrera/grado, Universitat Politècnica de València]. https://riunet.upv.es/handle/10251/115904

Urrego, Y. F. S., & Méndez, G. A. V. (2023). Influencia de la escoria de cobre como material cementicio suplementario en morteros. *Revista EIA*, *20*(40), Article 40. https://doi.org/10.24050/reia.v20i40.1709

UNE-EN 12350-9. (2011). Norma Española Parte 9: Hormigón autocompactante Ensayo del embudo en V.

UNE-EN 12350-8. (2020). Norma Española Parte 8: Hormigón autocompactante ensayo del escurrimiento.

UNE-EN 12390-1. (2022). Norma Española Parte 1: Forma, dimensiones y otras características de las probetas y moldes.

UNE-EN 12390-2. (2020). Norma Española Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia.

UNE-EN 12390-3. (2020). Norma Española Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.

UNE-EN 1097-6. (2014). Norma Española Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua.

UNE-EN 1097-7. (2009). Norma Española Parte 7: Determinación de la densidad real del filler Metodo del picnómetro.

UNE-EN 933-1. (2012). Norma Española Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas Metodo del tamizado.

UNE-EN 12620:2003+A1. (2009). Áridos para hormigón.

UNE 83481 EX. (2016). Norma Española Experimental. Adiciones al hormigón.