



Facultad de Ingeniería

Escuela de Construcción Civil

Valorización de residuos industriales como áridos para el hormigón, Influencia sobre las propiedades físicas y mecánicas

Por

Francisco J. Catalán Castro

Tesis para optar al Grado de Licenciado en Ciencias de la Construcción y al
Título de Ingeniero Constructor

Profesor guía: Patricia Martínez Ramírez

Diciembre 2016

Dedicatoria

...Dedicada principalmente a mi familia, pilar fundamental en mi desarrollo como persona y en el camino como profesional.

Agradecimientos

En primer lugar agradezco a mi profesora guía Patricia Martínez por el apoyo y la motivación para realizar y terminar esta investigación. Además de profesores y funcionarios de la Escuela de Ingeniería en Construcción por la buena disposición y apoyo en este proceso.

También debo agradecer al personal de laboratorio de la Escuela de Ingeniería en Construcción, por el apoyo y la ayuda en la realización de ensayos para esta investigación además de la grata compañía con la que compartían día a día.

A compañeros y amigos quienes estuvieron durante toda la etapa universitaria y en este último proceso para culminar mi formación profesional.

A toda mi familia, Especialmente a Mónica Castro, José Castro quienes siempre confiaron en mis conocimientos y mis ganas para concluir una carrera, además a Iris Colina Q.E.P.D. quien me apoyo siempre incondicionalmente. A toda mi familia mis más grandes y sinceros agradecimientos.

Índice

Dedicatoria.....	2
Agradecimientos	3
Glosario.....	6
Lista de Abreviaturas	7
Índice de tablas	9
Índice de figuras	10
Resumen	11
Abstract.....	12
1. Antecedentes Generales.....	14
1.1 Introducción	14
1.2 Objetivos.....	17
1.2.1 Objetivo general	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
1.3 Hipótesis de trabajo	17
1.4 Alcances y limitaciones	18
1.5 Estructura de la investigación	18
2. Antecedentes generales sobre residuos industriales y su influencia como áridos.	21
2.1 Generación de Residuos.....	21
2.1.2 Generación de residuos en Chile.....	22
2.1.3 Residuos producidos en la Industria de la Construcción en Chile (RESCON)	23
2.1.4 Residuos producidos en la Industria Minera en Chile	26
2.1.5 Medidas ambientales y marco legislativo para el manejo de residuos de las industrias en Chile	29
2.2 Uso de residuos industriales como áridos	31
2.2.1 Generalidades	31
2.2.2 Áridos reciclados de hormigón (ARH).....	31
2.2.3 Escoria de Fundición de Cobre (EFC)	37
3. Metodología de la Investigación.....	44
3.1 Generalidades.....	44
3.2 Secuencia metodológica	44
3.3 Diseño experimental	47

3.3.1 Generalidades	47
3.3.2 Variables y/o constantes de la investigación.....	47
3.3.3 Factorial de ensayo	48
3.3.2 Caracterización de áridos	49
3.3.3 Dosificación	62
3.3.4 Preparación de las mezclas de hormigón	64
3.3.5 Probetas para las muestras de hormigón	65
3.3.6 Ensayos de resistencias mecánicas	65
4. Desarrollo y análisis de resultados.....	68
4.1 Generalidades.....	68
4.2 Docilidad del hormigón.....	68
4.3 Ensayo a compresión.....	70
4.3.1 Ensayo a compresión a 7 y 28 días	70
4.3.2 Resistencia a compresión en función a la edad del hormigón.....	72
4.4 Ensayo a tracción por flexión	73
4.4.1 Ensayo a flexo- tracción a 7 y 28 días	73
4.4.3 Resistencia a flexo- tracción en función a la edad del hormigón.....	75
4.5 Densidad del hormigón	76
5. Conclusiones y proposiciones de futuras investigaciones	79
5.1 Generalidades.....	79
5.2 Conclusiones	79
5.3 Resumen de las conclusiones, futuras investigaciones y conclusiones generales.....	81
6. Bibliografía.....	83
7. Anexos	88
7.1 Ensayos granulométricos	88
7.3 Ensayo contenido de finos de áridos.....	95
7.4 Ensayo de desgaste Los Ángeles de árido gruesos	96
7.5 Dosificaciones por mezcla fabricada	98
7.6 Ensayo Asentamiento de cono.....	99
7.7 Ensayos mecánicos del hormigón.....	100
7.8 Densidad aparente del hormigón	102

Glosario

Árido convencional: árido procedente de yacimientos pétreos o plantas de áridos, utilizado en la fabricación de hormigón.

Árido reciclado: árido resultante del tratamiento de material inorgánico previamente utilizado en la construcción.

Árido reciclado de hormigón: árido resultante del tratamiento (trituration) proveniente de hormigones de demolición.

Árido sustentable: áridos procedentes de residuos o subproductos industriales cuyo uso como árido supone una ventaja ambiental.

Escoria de fundición de cobre: Subproducto industrial procedente de la fundición del cobre, a través del proceso piro metalúrgico, constituido principalmente por sílice y hierro.

Mata: Mezcla sulfurada constituida por sulfuro de cobre y sulfuro de hierro.

Mortero adherido: Material ligado a la partícula de árido natural, compuesto principalmente de cemento, agua y finos.

Residuo: son sustancias u objetos que habiendo llegado al final de su vida útil se desecan, procediendo a tratarlos mediante valorización o eliminación.

Residuos inertes: aquellos que no presentan efectos sobre el medio ambiente.

Residuos peligrosos: aquellos materiales desecados que presentan alguna de las siguientes características, toxicidad, inflamabilidad, reactividad y corrosividad.

Relleno sanitario: lugar destinado a la disposición final de residuos que cumplen con la legislación (D.S. N° 189).

Vertedero: lugar destinado a la disposición final de residuos que no cumplen con la legislación vigente, pero cuentan con autorización sanitaria.

Basural y vertedero municipal: lugar destinado a la disposición final de residuos que no cumplen con la legislación ni con autorización.

Lista de Abreviaturas

ap: aparente.

apm: aparente media.

AR: Árido Reciclado

ARH: Árido Reciclado de Hormigón.

ASTM: American Society of Testing and Materials (Sociedad Americana de Pruebas y Materiales).

CChC: Cámara Chilena de la Construcción.

cm: centímetro

CONAMA: Comisión Nacional del Medio Ambiente.

D.F.L.: Decreto con Fuerza de Ley.

Dn: Tamaño máximo nominal del árido.

D.S.: Decreto Supremo.

EFC: Escoria de Fundición de Cobre.

Eurostat: European Statistics (Estadísticas Europeas).

fc: Resistencia especificada a compresión.

fr: Resistencia media requerida.

ft: Resistencia especificada a flexo- tracción.

HF: Horno de Fundición.

INE: Instituto Nacional de Estadísticas.

máx: máximo.

mm: milímetros.

MINSAL: Ministerio de Salud.

MINSEGPRES: Ministerio Secretaria General de la Presidenta.

MMA: Ministerio del Medio Ambiente.

MPa: Mega Pascal.

NCh: Norma Chilena.

OCDE: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico.

Of: Oficial.

OGUC: Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones.

PIB: Producto Interno Bruto.

RCD: Residuo de Construcción y Demolición.

RETC: Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes.

REP: Responsabilidad Extendida del Productor.

RESCON: Residuo de Construcción.

Rft: Resistencia a flexo-tracción.

RISES: Residuos Industriales Sólidos.

Rm: Resistencia media.

UE: Unión Europea.

UNE: Unión de Naciones Europeas.

Índice de tablas

Tabla 2.1 Residuos generados por obras en Chile, ton/año	24
Tabla 2.2 Composición de residuos en la construcción	25
Tabla 2.3 Generación de residuos por extracción de cobre en Chile	26
Tabla 2.4 Cantidades de residuos generados por divisiones de Codelco	27
Tabla 2.5 Cantidad de residuos masivos generados por divisiones Codelco	27
Tabla 2.6 Cantidades de residuos generados por División Ventanas	29
Tabla 2.7 Contenido de material fino aceptable, Normas Europeas	32
Tabla 2.8 Densidades de los ARH	33
Tabla 2.9 Resultados de Absorción del ARH	34
Tabla 2.10 Resultados de características físicas de la EFC	39
Tabla 3.1 Definición de tipos de mezclas para confección de hormigón	48
Tabla 3.2 Diseño factorial de ensayo para muestras de hormigón	49
Tabla 3.3 Absorción de áridos gruesos, gravilla y ARH	59
Tabla 3.4 Absorción de áridos finos, arena y EFC	59
Tabla 3.5 Volumen estimado de agua de amasado y aire atrapado, m3	63
Tabla 7.1 Granulometría del árido grueso, gravilla convencional	88
Tabla 7.2 Granulometría reciclado de hormigón	88
Tabla 7.3 Granulometría del árido fino, arena convencional	89
Tabla 7.4 Granulometría Escoria de Cobre (EFC)	89
Tabla 7.5 Granulometría de áridos combinados convencionales	90
Tabla 7.6 Granulometría áridos combinados gruesos	90
Tabla 7.7 Granulometría áridos combinados finos	91
Tabla 7.8 Granulometría áridos combinados finos	92
Tabla 7.9 Granulometría áridos combinados, mezcla A	93
Tabla 7.10 Granulometría áridos combinados, mezcla B	94
Tabla 7.11 Granulometría áridos combinados, mezcla C	94
Tabla 7.12 Densidad y absorción de áridos gruesos	94
Tabla 7.13 Densidad y absorción de áridos finos	95
Tabla 7.14 Contenido de fino de áridos	95
Tabla 7.15 Granulometría de ARH, para determinación del grado	96
Tabla 7.16 Determinación del grado de la muestra de ARH	96
Tabla 7.17 Granulometría de EFC, para determinación del grado	97
Tabla 7.18 Determinación del grado para muestra de EFC	97
Tabla 7.19 Resumen resultado desgaste de áridos	98
Tabla 7.20 Dosificación con corrección de humedad de áridos, 1	98
Tabla 7.21 Dosificación con corrección de humedad de áridos, 2	99
Tabla 7.22 Valores medidos de asentamiento de cada mezcla	99
Tabla 7.23 Resultado a compresión, 7 días	100
Tabla 7.24 Resultado a compresión, 28 días	100
Tabla 7.25 Resultado a flexotracción, 7 días	101
Tabla 7.26 Resultado a flexotracción, 28 días	101
Tabla 7.27 Densidad aparente probetas cubicas, 7 y 28 días	102
Tabla 7.28 Densidad aparente probetas prismáticas, 7 y 28 días	103

Índice de figuras

Figura 2.1 Generación de residuos por actividades económicas y hogares, UE ...	21
Figura 2.2 Generación de residuos industriales por sector	22
Figura 2.3 Clasificación de residuos en Construcción.....	25
Figura 2.4 Ubicaciones geográficas -divisiones Codelco	28
Figura 2.5 Resistencia a compresión en función al porcentaje de sustitución de árido reciclado	36
Figura 2.6 Etapas de un proceso de fundición.....	37
Figura 2.7 Componentes de las escorias Fundición Ventanas	40
Figura 3.1 Esquema metodológico, parte 1	45
Figura 3.2 Esquema metodológico, parte 2	46
Figura 3.3 primera etapa demolición de ARH	50
Figura 3.4 Método de demolición, ARH y EFC	50
Figura 3.5 EFC tamaño menor 4,75 mm.....	51
Figura 3.6 Curva granulométrica gravilla convencional.....	52
Figura 3.7 Curva granulométrica ARH	53
Figura 3.8 Curva granulométrica arena convencional.....	53
Figura 3.9 Curva granulométrica EFC	54
Figura 3.10 Curva áridos combinados gravilla- arena convencional	54
Figura 3.11 Curva árido combinado Mezcla A	55
Figura 3.12 Curva árido combinado Mezcla B	56
Figura 3.13 Curva árido combinado Mezcla C	56
Figura 3.14 Grafica comparativa de densidad de áridos gruesos	57
Figura 3.15 Grafica comparativa de densidad de áridos finos	58
Figura 3.16 Contenido de finos.....	60
Figura 3.17 Contenido de finos.....	60
Figura 3.18 Desgaste de los Ángeles	61
Figura 3.19 Moldes estandarizados, para confección de probetas	65
Figura 3.20 Esquema de ensayo a compresión.....	66
Figura 3.21 Esquema del ensayo a flexotracción	66
Figura 4.1 Docilidad del hormigón de las distintas mezclas	68
Figura 4.2 Resultados Ensayo a compresión.....	70
Figura 4.3 Comparación de resistencia a compresión, mezclas	71
Figura 4.4 Evolución de la resistencia en función de la edad del hormigón	72
Ilustración 4.5 Resultados Ensayo a Flexo-tracción.....	73
Figura 4.6 Comparación de resistencia a flexotracción, mezclas.....	74
Figura 4.7 Evolución de la resistencia en función a la edad del hormigón	75
Figura 4.8 Densidad aparente mezclas de hormigón.....	76
Figura 4.9 Diferencia de Densidad de las distintas mezclas de hormigón.....	77
Figura 7.1 Curva áridos combinados gruesos.....	91
Figura 7.2 Cuerva áridos combinados finos.....	92
Figura 7.3 Curva áridos combinados finos.....	93

Resumen

Los residuos industriales son materiales que aportan como contaminantes al planeta en grandes cantidades. Estos se definen como materias generadas en las actividades de producción y consumo, que no han alcanzado un valor económico en el contexto en el que son producidas. Principalmente las industrias que mayor aporte contaminante generan son la industria de la Minería y la industria de la Construcción, estas aportan en forma de escorias del proceso de extracción del cobre y en forma de desechos de construcciones y demoliciones de hormigón respectivamente.

La presente investigación estudia el comportamiento de ambos residuos como áridos a través de una caracterización y su influencia en la incorporación en distintas mezclas de sustitución al hormigón, para observar el comportamiento frente a propiedades físicas como la trabajabilidad, densidad y propiedades mecánicas a compresión y flexo-tracción.

Los resultados del estudio determinaron que ambos residuos presentan características variables entre sí, y en comparación con un árido normal presentan mínimas diferencias específicamente en densidad. Lo destacable de estos materiales es su ventaja al utilizar mezclas de escoria y reciclado de hormigón para fabricar hormigones. Estos mejoran prácticamente en un 8 % propiedades a compresión del hormigón, además de mantener la densidad y trabajabilidad.

Sin embargo lo importante del estudio, es que ambos residuos podrían ser utilizados para fabricar mezclas de hormigón bajo ciertas condiciones indicadas en esta investigación, y además incentivar su uso al valorizar y reutilizar estos desechos.

Abstract

Industrial waste is a material that pollutes the planet in large quantities. These are defined as materials generated in production and consumption activities, which have not reached an economic value in the context in which they are produced. Mainly the industries that contribute the highest pollutant are the Mining industry and the Construction industry, these contribute in the form of slags from the copper extraction process and in the form of construction waste and concrete demolitions respectively.

The present research studies the behavior of both residues through a characterization and its influence in the incorporation in different mixtures of substitution to the concrete, to observe the behavior against physical properties as the workability, density and mechanical properties to compression and flexo –traction.

The results of the study determined that both residues present variable characteristics to each other, and in comparison with a normal arid they present minimum differences specifically in density. The highlight of these materials is their advantage when using slag blends and recycling of concrete to make concrete. These improve practically in 8% properties to compression of the concrete, besides maintaining the density and workability.

However the important thing of the study, is that both residues could be used to make mixtures of concrete under certain conditions indicated in this research, and also to incentivize its use in valorizing and reusing these wastes.

Capítulo I

Antecedentes Generales

1. Antecedentes Generales

1.1 Introducción

Los residuos industriales a nivel mundial, constituyen una cantidad no menor, que aportan como materiales contaminantes a la tierra. Estas cifras, en países miembros de la Unión Europea, llegan a 2,5 millones de miles de toneladas. Las principales industrias que inciden en esta cifra de manera significativa son la industria de la construcción, siguiéndola la industria de minería (Eurostat, 2010).

De acuerdo al marco legislativo establecido por la directiva del parlamento y consejo europeo consideran la manipulación, la valorización y eliminación, además de establecer los requisitos esenciales para la gestión de residuos. Debido a estas consideraciones y a que su objetivo es maximizar el reciclaje y minimizar el vertido de los residuos, los miembros de la UE llevan la delantera en cuanto al desarrollo de estrategias para la gestión de residuos.

En Chile, hace algunos años, el manejo de los residuos se plantea como preocupación en los distintos sectores sociales, aunque sin soluciones efectivas. El problema radica en que las soluciones solo se enfocan en la eliminación y almacenamiento. Actualmente, a través del Ministerio de Medio ambiente del Gobierno de Chile, se propuso el proyecto de Ley para la Gestión de Residuos y Responsabilidad Extendida del Productor (REP), que busca hacer completamente responsable al fabricante durante todo el ciclo de vida de un producto (Ministerio del Medio Ambiente, 2013).

La construcción en Chile es una de las industrias que genera un alto nivel de productividad para el país, pero así también grandes cantidades en toneladas de residuos sólidos, por los que es una fuente constante de residuos sólidos provenientes de demolición de edificaciones o por el desecho de materiales durante el desarrollo de una obra. La construcción en el año 2011 generó 32,7 millones de toneladas de residuos (Instituto Nacional de Estadísticas, 2011). Estos se categorizan por ser Residuos de Construcción y Demolición (RCD), los que se clasifican por residuos minerales, metálicos, madera, vidrio, plásticos, etc. El mayor porcentaje corresponde a residuos del tipo mineral no peligroso (suelos y hormigones). Debido a la falta de planificación para una adecuada gestión final son llevados a vertederos lo cual termina siendo una operación de forma incontrolada. Una gran cantidad de vertederos para residuos de construcción, son controlados por normativas y decretos establecidos por el Ministerio de Salud y Ministerio de Medioambiente. Estos documentos son de carácter general, por lo que no existen normativas que exijan específicamente una gestión de este tipo de residuos en el país.

También la industria minera genera grandes cantidades en toneladas de residuos en los procesos de extracción de cobre, los que se clasifican como peligrosos y no peligrosos, como residuos líquidos y sólidos. Los residuos mineros cuentan con una gran cantidad de reglamentaciones ambientales y de almacenamiento. Desde comienzos del año 2000, CODELCO desarrolla un plan de gestión de Residuos Industriales Sólidos (RISES) con la identificación de todos sus residuos, segregación en origen y mejores sitios para su disposición final. El 2011 se oficializó el documento “directrices para una gestión ambiental adecuada de los residuos sólidos”, en él se establece los principios necesarios para que las divisiones gestionen de manera adecuada los RISES que generan sus sistemas productivos. Pero aún no se establece una legislación para la revaloración, reutilización ni reciclaje de sus residuos sólidos.

La minería genera tres tipos de residuos, los residuos mineros masivos (escorias, relaves, ripios y material estéril), residuos provenientes de sistemas de captación de aire (barros arsenicales, borras plomadas, residuos del proceso de lixiviación), y otros residuos sólidos (envases plásticos, filtros, baterías, etc.).

Por otra parte respecto a los residuos en general el gran problema existente, es el manejo y disposición final de residuos ya que genera altos costos ambientales, sociales y también un elevado costo económico para industrias y Municipios, algunos de ellos contratando empresas privadas para realizar la gestión o mediante manejo propio deben encargarse de la recolección, transporte y disposición final. Por lo general gran parte de residuos sólidos son dispuestos en vertederos y micro-basurales ilegales afectando a zonas urbanas o comunas de bajos ingresos.

El reciclaje y el uso de residuos en el país, paulatinamente aumenta, principalmente lo que son materiales como plásticos y papeles. En el caso de residuos de industrias como las escorias de procesos de fundición de cobre son gestionadas por las empresas que las producen, pero su reutilización es muy escasa. En algunos países es utilizada como materiales para construcción, reemplazando áridos y cementos. En Chile se han realizado caracterizaciones de estos materiales obteniendo resultados satisfactorios (Sánchez, 2004; Cedoya, 2009).

El reciclado de hormigones ya es utilizado como árido, principalmente en España además de ser gestionados por empresas (García C., 2009). Este material se utiliza como reemplazo parcial de áridos naturales (gruesos) para la confección de hormigones de bajas resistencias, debido a que estudios aseguran que utilizando granulometrías adecuadas y con un reemplazo en un 20% del agregado grueso, se logra alcanzar propiedades mecánicas similares a la de un hormigón con áridos naturales (Martínez y Mendoza, 2006; EHE, 2008).

Las escorias como se mencionó en párrafos anteriores son poco utilizadas, pero en estudios su uso principal es como árido. Cuando se realiza un remplazo de áridos naturales (gravas y arenas), por escoria para la confección de hormigones, se observa un aumento en sus propiedades mecánicas, como también sus propiedades físicas (Gálvez, 2014; Morales, 2013; Cedoya, 2009).

Generalmente el objetivo principal en el estudio del uso de áridos reciclados o residuos de industrias, en la confección de un nuevo hormigón, es reemplazar parte de los áridos convencionales para mantener la calidad y propiedades de éste. De tal manera que, disminuye el uso de árido natural y genera una valorización y reutilización de un material que no contaba con una mayor vida útil (Castillo, 2015).

Según los antecedentes recopilados, se estudiará el efecto del reemplazo de escoria de cobre en el comportamiento del hormigón con árido reciclado. Además de evaluar si la escoria y el reciclado de hormigón permiten mejorar ó asimilar las propiedades físicas y mecánicas del hormigón patrón.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Analizar la influencia del uso de residuos industriales como áridos para el hormigón sobre las propiedades físicas y mecánicas, reemplazando el árido fino por escoria de cobre y el árido grueso por reciclado de hormigón demolido, como alternativa para la valorización de residuos industriales.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades físicas de las escorias provenientes de la producción de cobre.
- Caracterizar las propiedades físicas de reciclados de hormigón provenientes de demolición.
- Determinar el efecto del reemplazo en sustitución de 20% de reciclado de hormigón demolido (ARH) por el árido grueso, sobre propiedades físicas y mecánicas del hormigón convencional.
- Determinar el efecto del reemplazo en sustitución de 25 y 50% de Escoria de Fundición de Cobre (EFC) por árido fino, sobre las propiedades físicas y mecánicas del hormigón con 20% ARH.

1.3 Hipótesis de trabajo

Para el presente estudio se plantea que,

“Es posible usar residuos industriales como áridos, EFC como arenas y ARH como gravilla, para la fabricación de hormigón permitiendo la obtención de propiedades similares a un hormigón patrón”

1.4 Alcances y limitaciones

- Los ensayos y evaluaciones se realizarán en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería en Construcción de la Universidad de Valparaíso, Playa ancha.
- Para la confección de la mezcla cementicia se utilizará cemento portland puzolánico grado corriente nacional.
- El árido reciclado se obtuvo de la trituración de probetas de hormigón presentes en las dependencias del laboratorio de la Escuela de Ingeniería en Construcción de la Universidad de Valparaíso.
- La escoria se obtuvo del proceso de fundición de cobre realizada en Codelco puerto de Ventanas. Región de Valparaíso. Su trituración se realizó en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería en Construcción de la Universidad de Valparaíso.

1.5 Estructura de la investigación

La estructura del presente estudio se divide en 8 capítulos que ayudarán al cumplimiento de los objetivos de trabajo y a la hipótesis planteada.

En el primer capítulo se presentan los antecedentes generales de la investigación. En este capítulo se desarrolla la introducción de la investigación abarcando la problemática desde lo global hasta lo particular, de tal forma que permita justificar la realización del tema. Objetivos generales y específicos, la hipótesis de trabajo y los alcances y limitaciones que encausarán esta investigación.

El segundo capítulo presenta toda la información teórica relacionado al tema que trata la investigación. Aspectos generales sobre los residuos industriales generados por la Construcción y Minería, y la reutilización de los principales residuos como áridos reciclados. Además las características de los áridos y las propiedades del hormigón.

El tercer capítulo presenta la metodología de investigación definida por etapas y representadas a través de un diagrama de flujo, esto permite llevar el orden en el desarrollo de la tesis. Además contiene el diseño experimental, incluyendo la caracterización de los áridos y dosificaciones para el desarrollo de hormigones. Finalmente se realizan los ensayos establecidos por la Normativa Chilena aplicada al uso de áridos para hormigón, preparación de mezclas y probetas de hormigón.

El cuarto capítulo se presenta y analizan los resultados obtenidos de los ensayos realizados en laboratorio.

En el quinto capítulo se desarrollan las conclusiones de la investigación y la proposición de las futuras investigaciones.

El sexto capítulo presenta los enlaces e información respecto a referencias citadas dentro de la investigación.

El séptimo capítulo presenta anexos de la investigación, aquella información adicional no incorporada en capítulos anteriores, tablas y graficas de datos y resultados analizados.

Capítulo II

Antecedentes Generales
sobre residuos industriales
y su influencia como áridos

2. Antecedentes generales sobre residuos industriales y su influencia como áridos.

2.1 Generación de Residuos

Los residuos son aquellas materias generadas en las actividades de producción y consumo, que no han alcanzado un valor económico en el contexto en el que son producidas (Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico). Los residuos sólidos son sustancias u objetos que habiendo llegado al final de su vida útil se desechan, procediendo a tratarlos mediante valorización o eliminación (CONAMA Chile).

Los residuos constituyen uno de los principales problemas ambientales a los que se enfrenta el mundo. Sin embargo, la sociedad no es consciente de su repercusión, principalmente se fijan en el espacio que ocupan los residuos, el impacto visual, suciedad, malos olores, pero no en sus efectos sobre el medio natural (CONAMA España).

Principalmente existen dos sectores dentro de una nación en donde se generan residuos, al final de un proceso de producción en industrias, y lo desechado en recintos domiciliarios y comerciales (OCDE).

Todos los países miembros de la Unión Europea (U.E.) están conscientes que los residuos además de ser un problema en sí mismos, pueden agravar muchos otros problemas. Por esto es necesario hacer un esfuerzo en materia de gestión. A través del departamento de estadísticas de la organización de la UE (Eurostat), generó un documento que presenta las cifras sobre evolución y generación de residuos en sectores industriales al año 2012. Estos valores son presentados a través de la figura 2.1.

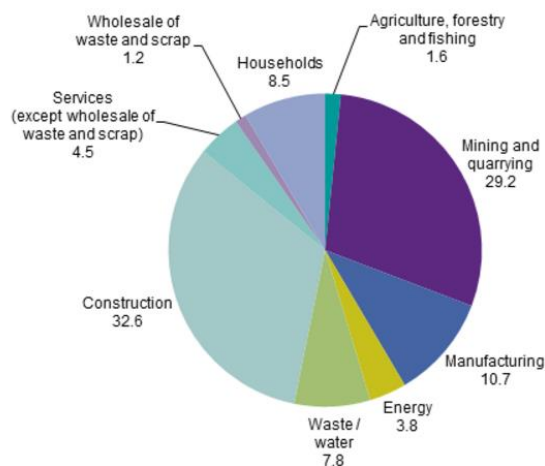


Figura 2.1 Generación de residuos por actividades económicas y hogares, UE

Fuente: Eurostat, 2012

Se observa que las actividades económicas son quienes producen mayores cantidades de residuos, específicamente las industrias de construcción y minería. La construcción es responsable de un 32,6% esto representa una cifra de 855 millones de toneladas. Y el sector minero un 29,2 % aproximadamente representa 727 millones de toneladas (Eurostat, 2012).

2.1.2 Generación de residuos en Chile

En Chile, desde hace décadas, el manejo de los residuos se plantea como preocupación en los distintos sectores sociales. Existen patrones de producción y consumo que favorecen cada vez más a la generación de residuos, principalmente el crecimiento y concentración de la población (CONAMA Chile, 2010).

En Chile son las industrias quienes aportan una mayor cantidad de residuos que lo generado por la población urbana y rural. Entre el 2009 y 2010 se presentó el documento “Levantamiento, análisis, generación y publicación de información nacional sobre residuos sólidos de Chile” (CONAMA Chile, 2010). Los resultados se obtuvieron a través de estudios anteriores, encuestas a municipalidades y empresas generadoras de residuos. Los resultados del documento, en el año 2009, presentan una generación de 16,9 millones de toneladas de residuos, de las cuales 10,4 millones de toneladas corresponden a residuos industriales.

Dentro de los residuos generados por la industria en Chile, la construcción aporta un 56%, luego le siguen las industrias manufacturera, forestal, minería y otras, como se observa en la figura 2.2.



Figura 2.2 Generación de residuos industriales por sector

Fuente: CONAMA, 2010.

El sector construcción generó aproximadamente 5 millones de toneladas de residuos en el año 2011.

Para enfrentar lo complejo de este tema, Chile ha realizado importantes avances en esta materia. En 1995 la totalidad de los residuos generados en recintos domiciliarios y comerciales se disponía en vertederos y basurales. Desde el 2005, más del 60% de los residuos se disponen en rellenos sanitarios que cumplen una serie de exigencias técnicas sanitarias y ambientales (CONAMA Chile). El sector industrial avanza más lento en buscar soluciones al manejo de residuos, debido a que son las mismas empresas en gestionar sus propios residuos. Actualmente a través del Ministerio del Medio Ambiente (MMA) se promulgo la ley para la Gestión de Residuos y Responsabilidad Extendida del Productor que busca hacer completamente responsable al fabricante durante todo el ciclo de vida de un producto (MMA).

2.1.3 Residuos producidos en la Industria de la Construcción en Chile (RESCON)

El sector de la construcción, junto con representar un gran aporte al desarrollo productivo del país, es una actividad que demanda altos niveles de consumo de recursos no renovables y de energía en sus distintas formas, por esto es considerada una fuente constante de generación de residuos (Burgos, 2010).

Principalmente estos residuos proceden de derribos de edificaciones antiguas, rehabilitación o reparación, ejecución de nuevas obras y trabajos de excavación (Burgos, 2010; Chauveinc, 2011; Molina, 2015).

Los RESCON es todo aquel material de desecho generado por la actividad de demolición, excavación, remodelación y/ o construcción de una obra tanto pública como privada. El que puede ser valorizado o eliminado (Cámara Chilena de la Construcción, 2012).

En la tabla 2.1 se presentan las cantidades de residuos que generan las empresas por ejecución de proyectos en distintas regiones del país. Este documento fue presentado por el Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC) departamento del MMA al año 2014.

Tabla 2.1 Residuos generados por obras en Chile, ton/año

Región	Comuna	nombre (capítulo LER)	Nombre Establecimiento	cantidad (ton/año)
Magallanes y de la Antártica Chilena	Punta Arenas	Residuos de la construcción y demolición (incluida la tierra excavada de zonas contaminadas).	CONSTRUCTORA VILICIC SA	30
Metropolitana	Santiago	Residuos de la construcción y demolición (incluida la tierra excavada de zonas contaminadas)	CONSTRUCCIÓN EDIFICIO INSTITUCIONAL FISCALÍA NACIONAL	3874
Valparaíso	Putendo	Residuos no especificados en otro capítulo de la lista	EMBALSE CHACRILLAS	43,21
Valparaíso	Putendo	Residuos de la construcción y demolición (incluida la tierra excavada de zonas contaminadas)	EMBALSE CHACRILLAS	147,94
Araucanía	Temuco	Residuos de la construcción y demolición (incluida la tierra excavada de zonas contaminadas)	HACIENDA MARIPOSAS	362,25
Valparaíso	Viña del Mar	Residuos de la construcción y demolición (incluida la tierra excavada de zonas contaminadas)	INSTALACIONES DE FAENAS DE OBRA CONSTRUCCIÓN ESTACIONAMIENTOS SUBTERRÁNEOS PLAZA SUCRE	530,42
Valparaíso	Viña del Mar	Residuos de la construcción y demolición (incluida la tierra excavada de zonas contaminadas)	INSTALACIONES DE FAENAS DE OBRA REPOSICIÓN PARCIAL ESTADIO MUNICIPAL SAUSALITO	25305
Los Ríos	Valdivia	Residuos de la construcción y demolición (incluida la tierra excavada de zonas contaminadas)	INSTALACIONES DE FAENAS EN OBRA CONSTRUCCIÓN CIRCUNVALACIÓN VALDIVIA Y PUENTE SANTA ELVIRA	6,77
Los Lagos	Puerto Montt	Residuos de la construcción y demolición (incluida la tierra excavada de zonas contaminadas)	INSTALACIONES DE FAENAS EN OBRA CONSTRUCCIÓN CONEXIÓN VIAL RUTA 5, PUERTO MONTT- RUTA 7,	21,98
Metropolitana	Cerrillos	Residuos de la construcción y demolición (incluida la tierra excavada de zonas contaminadas)	INSTALACIONES DE FAENAS EN OBRA CONSTRUCCIÓN OO.CC. PIQUE NUEVA LA RURAL Y PIQUE PORTUGAL,	11,7
Araucanía	Pucón	Residuos de la construcción y demolición (incluida la tierra excavada de zonas contaminadas)	LOS ROBLES	39,39
Antofagasta	Calama	Residuos de la construcción y demolición (incluida la tierra excavada de zonas contaminadas)	PATIO 4 PROMET CALAMA	123,7
Metropolitana	Colina	Residuos de la construcción y demolición (incluida la tierra excavada de zonas contaminadas)	PLANTA CHACABUCO	596,48
Magallanes y de la Antártica Chilena	Punta Arenas	Residuos de la construcción y demolición (incluida la tierra excavada de zonas contaminadas)	SERVIAUSTRAL LTDA	14

Fuente: RETC, 2014

En la tabla anterior cada ejecución de obra presenta la cantidad de residuos que genera por año, estos pueden ser de diversos tipos, peligrosos, no peligrosos, inertes, orgánicos e inorgánicos (CChC, 2012).

Básicamente, la composición de residuos varía según el tipo de infraestructura, la etapa en que se encuentre el proyecto y los tipos de materiales utilizados, tratándose de residuos constituidos por tierras y áridos mezclados, piedras, restos de hormigón, ladrillos, cristales, restos de pavimentos asfálticos, materiales refractarios, plásticos, yesos, maderas, entre otros (Burgos, 2010; CChC, 2012).

La generación de RESCON durante la ejecución de un proyecto, se puede clasificar según lo presente en la figura 2.3.



Figura 2.3 Clasificación de residuos en Construcción

Fuente: CChC, 2012

Principalmente las actividades de inicio de cualquier proyecto, que contemplan movimientos de tierra y demoliciones generan gran cantidad de residuos del tipo inertes, aquellos que no presentan mayor riesgo de contaminación de aguas, suelos y aire. Estos residuos son constituidos en general por ladrillos, azulejos, hormigón, morteros endurecidos, suelos. En la tabla 2.2 se presenta una clasificación de residuos acuerdo a cantidades en que se generan.

Tabla 2.2 Composición de residuos en la construcción

MATERIAL	% COMPOSICIÓN	MATERIAL	% COMPOSICIÓN
ARIDOS	79%	CERAMICA MURO	0,06%
CEMENTOS	11,20%	PIZARREÑO	0,05%
LADRILLOS	5,36%	BALDOSA	0,05%
REVEST. PLÁSTICOS	2,38%	TUBO FIERRO	0,04%
MADERAS	0,45%	FLEXIT	0,04%
YESO	0,39%	FIERRO PE	0,03%
FIERRO REDONDO	0,32%	PLANCHA ZINC	0,02%
CAÑERIAS COBRE	0,21%	AZUEJOS	0,02%
MASISA	0,18%	TUBOS PVC	0,01%
PARQUET	0,13%	FIERRO PL	0,01%
TEJA ARCILLA	0,13%	BLOQUES	0,01%
CERAMINA PI.	0,10%	TEJA PIZ	0,01%
CLAVOS Y TORNILLOS	0,08%	ALFOMBRA	0,01%
ALAMBRE	0,06%		

Fuente: CONAMA, 2010

Según la tabla 2.2, el mayor porcentaje de residuo corresponde a áridos con aproximadamente un 80% del total, estos materiales pétreos son provenientes de hormigones, asfaltos y pavimentos bituminosos demolidos.

A través de la figura 2.2 y la tabla 2.3 se puede determinar que los RESCON del tipo inertes son los que más abundan en la industria de la construcción. Es por esto que en países europeos ya han comenzado a implementar su reutilización, de tal manera de generar una industria con materiales sustentables.

2.1.4 Residuos producidos en la Industria Minera en Chile

La minería del cobre es la actividad más importante en Chile, aporta un porcentaje considerable del Producto Interno Bruto (PIB). Sin embargo el impacto ambiental que ha producido ha sido una preocupación permanente del Estado y de las empresas (Sánchez et. al, 2010).

En este sector, la generación de residuos sólidos es un tema relevante en materia ambiental, no solo por su clasificación como peligroso o no peligroso, sino también por los grandes volúmenes que genera (Codelco- Ventanas, 2011). Además representa un 6% de la generación de residuos de la industria en Chile. En términos generales, en la tabla 2.3 muestra la cantidad de residuos generado por cada tonelada de cobre extraído.

Tabla 2.3 Generación de residuos por extracción de cobre en Chile

Residuos Sólidos	Tasa de generación (ton/ton Cu)
Escoria de fundición	~ 2
Relave de flotación	~ 100
Ripios de lixiviación	~ 200
Estéril de mina	~ 400

Fuente: Sánchez et. al, 2010

De la tabla anterior se destaca que para generar una tonelada de cobre, se generan grandes toneladas de residuos (Cedoya, 2009; Sánchez et. al, 2010).

Dentro de esta industria los residuos se clasifican por peligrosos, no peligrosos y masivos, a través del reporte sustentable realizado por Codelco se presentan las cantidades de residuos producidos por la industria en el año 2014 y 2015. Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Cantidades de residuos generados por divisiones de Codelco

Disposición de residuos sólidos por tipo (en toneladas)				
División	2014		2015*	
	Peligrosos	No peligrosos	Peligrosos	No peligrosos
Radomiro Tomic	4.785	7.675	3.653	4.431
Chuquicamata	23.970	39.213	30.101	41.801
Ministro Hales	18.953	1.837	51.187	2.741
Gabriela Mistral	869	406	1.269	460
Salvador	3.441	1.204	4.398	1.585
Ventanas	46.883	1.664	45.343	9.716
Andina	3.886	10.699	1.579	14.238
El Teniente	61.355	19.592	63.814	18.854
Total	164.142	82.290	201.344	93.826

Fuente: Codelco, 2015

Principalmente la tabla presenta el número en toneladas de residuos peligrosos y no peligrosos producidos en las distintas divisiones que presenta Codelco en Chile. La tabla 2.5 presenta los valores respecto a los residuos masivos generados por la industria minera.

Tabla 2.5 Cantidad de residuos masivos generados por divisiones Codelco

Cantidad generada de residuos mineros masivos 2015 (miles de toneladas)					
División	Relaves	Escoria	Estériles	Minerales de baja ley	Ripios de lixiviación
Radomiro Tomic	NA	NA	132.494	90	0
Chuquicamata	55.208	737	103.565	5.323	14.548
Ministro Hales	16.357	NA	85.336	0	0
Gabriela Mistral	NA	NA	31.966	0	11.869
Salvador	8.164	0	12.941	9.444	17
Ventanas	NA	278	NA	NA	NA
Andina	30.543	NA	50.321	0	NA
El Teniente	52.834	0	5.098	0	0

Fuente: Codelco, 2015

Los residuos mineros masivos son subproductos obtenidos en la producción y extracción del cobre, los que se constituyen por relaves, minerales de baja ley, ripios de lixiviación, estériles y escorias.

Tal como se indica en las tablas anteriores en Chile existen distintas divisiones de Codelco en la cual cada una genera una gran cantidad de residuos. Actualmente en Chile existen 7 divisiones, Fundición Ventanas y casa matriz a lo largo del país, las que se ubican geográficamente como se muestra en la figura 2.4, estas son:



Figura 2.4 Ubicaciones geográficas -divisiones Codelco

Fuente: Codelco, 2016

La Fundición de Ventanas se inicia con el traspaso de Ventanas a Codelco, acordada por las autoridades del gobierno con ambas empresas y con la participación de sus organizaciones laborales. Se encuentra ubicada en la localidad de Ventanas comuna de Puchuncaví, a 50 kilómetros de Viña del Mar, en el sector norte de la provincia de Valparaíso. Su lugar fue escogido por su cercanía a puerto de Valparaíso y Quintero, y debido a la disponibilidad del recurso hídrico. Su función principal es la extracción de cobre a través de los procesos piro- metalúrgicos, produciendo cátodos de cobre y ácido sulfúrico.

Los procesos que se generan en esta división cumplen la función principalmente de aumentar la ley o contenido de cobre del material sometido a fundición.

La tabla 2.6 presenta un resumen de las cifras totales de residuos generadas por Codelco Ventanas en los años 2011, 2014 y 2015, clasificados por peligrosos, no peligrosos y residuos masivos (Codelco, 2015).

Tabla 2.6 Cantidades de residuos generados por División Ventanas

Cantidades expresadas en miles de toneladas			
AÑO	2011	2014	2015
Residuos peligrosos	58	46	45
Residuos no peligrosos	1,7	1,6	9,7
Residuos mineros masivos	292	-	278

Fuente: elaboración propia

Las cifras entregadas en la tabla anterior respecto de los residuos masivos son cifras posteriores de un reprocesamiento de extracción de cobre, por lo que sigue presentando un gran inconveniente para la empresa la disposición final de este material. Las 278 mil toneladas de residuos masivos generados en esta división corresponden solo a escorias de fundición.

Las escorias son el subproducto que queda del proceso de extracción del cobre por fundición y estas son dispuestas en grandes depósitos ubicados dentro de la misma empresa.

2.1.5 Medidas ambientales y marco legislativo para el manejo de residuos de las industrias en Chile

En el ámbito internacional, específicamente los países miembros de la organización de naciones europeas respecto a gestión de residuos, estos se rigen a través del documento establecido por la directiva (2008/98/CE) del parlamento Europeo y el Consejo (UE). Este documento establece la manipulación de residuos en la comunidad, además define conceptos de valorización, eliminación y gestión de residuos, en particular las obligaciones que poseen las empresas.

En Chile el marco normativo asociado a residuos data desde el año 1967, con la publicación en el diario oficial del Código Sanitario que regula aspectos específicos de higiene y seguridad del medioambiente (CONAMA, 2010). Sin embargo, regular la disposición final de los residuos no es suficiente y es necesario redefinir el enfoque de la gestión de residuos en nuestro país.

El 2005 se aprobó la política de gestión integral de residuos sólidos, este documento fue aprobado por CONAMA a través de un comité técnico, dicho reglamento tiene por objetivo “lograr que el manejo de residuos sólidos se realice con el mínimo de riesgo para la salud de la población y el medio ambiente” (CONAMA).

El marco regulatorio que actualmente se refiere al manejo de residuos sólidos está compuesto por las siguientes leyes y decretos:

- DFL N° 725, del Ministerio de Salud (MINSAL), que establece el Código Sanitario. Año 1967.
- DS 685/1992 en que Chile ratifica el Convenio de Basilea, el cual regula el movimiento transfronterizo de desechos peligrosos y estipula obligaciones a las partes para asegurar el manejo ambientalmente racional de los mismos, particularmente su disposición.
- Ley 19300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, que incorpora el tema de los residuos en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental artículo 10 letras i) y o). Año 1994.
- DS 594/2000 del MINSAL sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo (proviene del D.S, 745 del año 1993).
- DS 148/2004 del MINSAL, que establece el Reglamento Sanitario Sobre Manejo de Residuos Peligrosos.
- DS 132/2004 Sernageomin Título VII: reglamento para el manejo de residuos sólidos mineros.
- DS 45/2007 de MINSEGPRES, el cual establece la norma de emisión para la incineración y co- incineración.
- DS 189/2008 del MISAL, que regula las condiciones sanitarias y de seguridad básicas en los rellenos sanitarios.
- DS 4/2009 del MINSAL, sobre el manejo de residuos generados en establecimientos de atención de salud.
- DS 4/2009 de MINSEGPRES, para el manejo de lodos generados en plantas de tratamientos de aguas servidas.
- Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, modificada por la Ley 20.417, establece como función del MMA proponer políticas y formular normas, planes y programas en materias de residuos (artículo 70 letra g).
- Ley 20.920 Establece marco para la Gestión de Residuos, la Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje. Aprobada el 1 de Junio del 2016.

Para los residuos sólidos provenientes de la industria minera, además de regirse a través del marco normativo por el MMA y MINSAL, es la misma industria quien se encarga de gestionar los subproductos o residuos. Actualmente el control de residuos sólidos se encuentra normado a través de:

- NCC 24- sobre identificación y planificación ante aspectos críticos en sustentabilidad desde las primeras etapas de cada proyecto de inversión hasta su cierre.
- NCC 38- sobre prevención, registro y control de incidentes ambientales.

Ambas normativas entraron en proceso de actualización en el periodo del 2015 (CODELCO, 2015).

Actualmente la legislación en Chile referente a la disposición de los residuos generados en la industria de la construcción es escasa, pues no existe una ley de aplicación general que regule en forma ordenada y específica el manejo de los residuos

(Burgos, 2010). Sin embargo, en la normativa Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (OGUC), establece obligaciones respecto al manejo, transporte y vertido de residuos en lugares autorizados.

Las normativas actuales referentes al manejo de residuos sólidos, tanto para el sector social (domiciliario y comercial) y sector industrial, establecen el control de los residuos generados, principalmente la valorización y eliminación de los residuos. Sin embargo, es necesario implementar normativas que incentiven al sector industrial y social al reciclaje de residuos.

2.2 Uso de residuos industriales como áridos

2.2.1 Generalidades

Se define “áridos sustentables” a todo residuo y subproducto industrial cuyo uso como áridos supone una ventaja ambiental (García, 2009). De esta definición se desprenden los residuos de la industria de construcción denominados áridos reciclados (NCh 163.n2013) y residuos de la minería o subproductos.

Los áridos reciclados son materiales procedentes del tratamiento (selección, trituración y cribado) de residuos de construcción y demolición (Sánchez, 2004; García, 2009). En función al origen de los áridos reciclados, estos se pueden clasificar principalmente en áridos reciclados procedentes de cerámicos, de pavimentos bituminosos, ladrillos, lozas y hormigón (Sánchez, 2004; García, 2009; Navarro, 2014).

Los Subproductos de la minería son materiales que provienen de los procesos de extracción de minerales y metales. Principalmente se clasifican como áridos siderúrgicos (Escorias) y cenizas.

Para el desarrollo de esta investigación se utilizarán áridos reciclados de hormigón (ARH) demolido proveniente del residuo de construcción y escoria de cobre proveniente de subproducto de minería.

2.2.2 Áridos reciclados de hormigón (ARH)

Se define como árido reciclado de hormigón al material producto del procesamiento de estructuras demolidas (escombros) de hormigón, en su mayoría contiene el árido natural de hormigón y mortero adherido (Molina, 2015).

Siendo el hormigón el material más utilizado en el área de la construcción, es natural que la idea de reciclarlo apareciera como una necesidad para la viabilidad ecológica del rubro; luego, la idea de reciclarlo como árido en nuevo hormigón surgió

como parte de una solución prometedora para ayudar al Medio Ambiente (Chauveinc, 2011; García, 2009).

2.2.2.1 Características de los ARH

Es necesario caracterizar los ARH, principalmente sus propiedades físicas y mecánicas, a través de los mismos ensayos normalizados que se realizan a los áridos naturales.

La Granulometría del ARH depende fundamentalmente del sistema de trituración que se haya empleado en su proceso de producción. Las trituradoras de impacto, por lo general, son las que permiten alcanzar reducidos tamaños en los áridos pero como consecuencia generan mayor cantidad de finos. A estas trituradoras le siguen las de conos y las machacadoras de mandíbulas con una producción de finos inferior. Para nuestro estudio se utilizará el ARH como agregado grueso, por lo que no será necesario emplear máquinas trituradoras. Una desventaja de este material es la gran cantidad de fino que se desprende durante la manipulación producto del mortero adherido a la partícula, este material varía entre un 0,27% y un 1,14% según un estudio realizado (Navarro, 2014) y la normativa Española indica que no debe superar el 5%. La tabla 2.7 muestra lo exigido por normativas en países de Europa.

Tabla 2.7 Contenido de material fino aceptable, Normas Europeas

	Contenido de fino, %
Normativa Inglesa (BS EN 206-1:2013)	5-3%
Normativa Alemana (DIN 4226-100 2002-02)	4%
Normativa Española (Anejo 15, EHE, 2008)	5%

Fuente: Navarro, 2014

En la tabla 2.7, según la norma Inglesa, el valor de un 3% corresponde si el tipo de árido proviene exclusivamente de hormigón y un 5% si provienen de materiales cerámicos.

El conjunto de Normas Chilenas que establece los ensayos a los áridos para hormigones consideraba áridos de densidades entre 2000 y 3000 kg/cm³. Actualmente la Normativa considera áridos de densidad mayor o igual a 2000 kg/cm³, por consiguiente, el uso de áridos reciclados y sus ensayos granulométricos para esta investigación serán regidos por la Norma Chilena 165 Of 2009.

La forma y textura en general de las partículas de ARH presentan una forma angulosa debido al tipo de trituración, además de una superficie rugosa que genera un

aumento en la fricción entre partículas, por lo tanto produce una disminución del asentamiento de cono (Aguilar, 2005).

La densidad de los áridos reciclados provenientes de demolición de hormigón, cualquiera que sea su procedencia, siempre es menor que la densidad de un árido convencional. Esto se debe al mortero adherido a la partícula lo que hace que la partícula sea más liviana.

Además el modo de trituración de los áridos influye considerablemente en la densidad de ellos. Alguno de los métodos de trituración de los AR son por impacto, trituración por cono y machacadora por mandíbulas. Siendo la trituración por impacto un método favorable en densidad del árido, ya que permite eliminar gran cantidad de mortero adherido a la partícula (Navarro, 2014).

En la tabla 2.8 se detallan las densidades obtenidas por diversos autores que realizaron la caracterización a áridos provenientes de residuos de hormigón.

Tabla 2.8 Densidades de los ARH

REFERENCIAS	(kg/m ³)				
	real sss	real seca	neta	aparente suelta	aparente compactada
Aguilar C., Muñoz M., Loyola O, 2005	2540	2440	2710	1297	1441
Sánchez M., 2004	2300-2450	2100-2400	-	-	-
Soto C., 2006	2445	2259	2721	1200	1503
Chauveinc J., 2011	2551	2432	2760	-	-
García S., 2012	2542	2459	2681	-	-
Molina J., 2015	2400	2245	2657	1390	1468

Fuente: elaboración propia

La absorción de los áridos reciclados de demolición es siempre mayor que un árido convencional, debido a la pasta de mortero adherida a la partícula. El rango de valor de absorción de un árido convencional oscila entre 0 y 3% según lo especificado en la Norma Chilena 163.n 2013. Y entre 0 – 4% según normativas internacionales, como por ejemplo UNE- EN 1097-6. Para los áridos reciclados según estudios internacionales y nacionales los valores oscilan entre 3% y 13%.

Consultando la bibliografía y diversos estudios, se tiene que los valores obtenidos de absorción de ARH en la tabla 2.9.

Tabla 2.9 Resultados de Absorción del ARH

REFERENCIAS	Absorción %	
	AG	AF
Aguilar C., Muñoz M., Loyola O, 2005	4,1	-
Sánchez M., 2004	4,8- 9,6	5,1-11,5
Soto C., 2006	7,1	-
Chauveinc J., 2011	4,89	9,59
García S., 2012	3,4	5,3
Molina J., 2015	6,9	-

Fuente: elaboración propia

El tamaño de la partícula influye directamente en la capacidad de absorción, siendo las partículas que pasan por el tamiz 4,75mm las que mayor porcentaje de absorción presentan.

2.2.2.2 Estudio de los ARH

El estudio de la utilización de áridos reciclados en la fabricación de nuevos hormigones ha sido objeto de investigación aproximadamente desde finales de la 2° guerra mundial, pero los últimos 20 años se ha intensificado su estudio principalmente en sus características (Aguilar et al, 2005; Navarro, 2014; Molina, 2015). Propiedades de los tipos de áridos, su influencia en las mezclas de hormigones han entregado resultados admisibles y satisfactorios, llegando a concluir que es factible su utilización debido a que obtiene propiedades similares a las de una mezcla de hormigón con áridos convencionales (Valle, 2002; Aguilar et al, 2005; Chauveinc, 2011; Navarro, 2014; Molina, 2015).

Los estudios realizados señalan que existe una leve disminución en las propiedades tanto físicas como mecánicas del hormigón empleando ARH. Sin embargo, los estudios varían uno de otro, principalmente debido a la procedencia y calidad de los ARH empleados para la confección de nuevos hormigones.

La cantidad de mortero adherido condiciona a este tipo de árido al verse afectadas propiedades como aumento en la absorción de agua, menor densidad, menor resistencia, menor dureza y una menor resistencia a la fragmentación (Navarro, 2014).

La utilización de áridos reciclados provenientes de hormigones en demolición como reemplazo de áridos finos en las mezclas de hormigón han resultado ser desventajosos para las propiedades de este. Todo material que pasa por el tamiz 5 mm al

tener las características de un árido fino presenta gran cantidad de contenido de fino provocando una disminución de la trabajabilidad y una elevada absorción de agua (Hansen, 1983; Aguilar, 2005).

Generalmente la utilización de reciclados de hormigón como reemplazo parcial o total del árido grueso en una mezcla de hormigón, entrega valores admisibles similares a un hormigón con áridos convencionales respecto a sus propiedades físicas y resistentes (Sánchez, 2004; Aguilar, 2005).

La procedencia de los áridos reciclados provenientes de un hormigón en desuso es una variable que influye en los resultados de las propiedades de las mezclas de hormigón, esto se debe generalmente a la calidad de los componentes con los que son fabricados. Frente a propiedades resistentes (compresión y flexión) los hormigones fabricados con áridos provenientes de probetas de laboratorio presentan mejores resultados que hormigones fabricados con áridos reciclados provenientes de pavimentos o estructuras de hormigón. Sin embargo ambos resultados tienen una disminución en comparación con un hormigón fabricado con áridos convencionales (Aguilar, 2005; Valle, 2002).

Determinar el porcentaje óptimo de reemplazo árido reciclado de hormigón es una tarea difícil. Las propiedades de un hormigón no solo dependen del contenido, sino además de múltiples variables. Estudios mencionan que a medida que aumenta el contenido de reemplazo proporcionalmente disminuye las propiedades resistentes del hormigón (Valle, 2002). Propiedades físicas como variaciones de volumen de la mezcla de hormigón (retracción hidráulica) se ven perjudicadas de acuerdo con la misma teoría (Soto, 2013). Con los antecedentes recopilados y sus resultados se observa que las propiedades físicas y mecánicas de un hormigón con áridos reciclados son similares pero disminuidas en comparación a un hormigón con áridos convencionales. ***Sin embargo, las propiedades resistentes similares se adquieren cuando se utilizan porcentajes entre 20% y 75% de reemplazo de áridos reciclados*** (Valle, 2002; Aguilar et al, 2005; García, 2009; Chauveinc, 2011; Soto, 2013; Molina, 2015).

La figura 2.5 presenta los resultados de diversos estudios con respecto a la resistencia a compresión del hormigón en función al porcentaje de sustitución de árido reciclado.

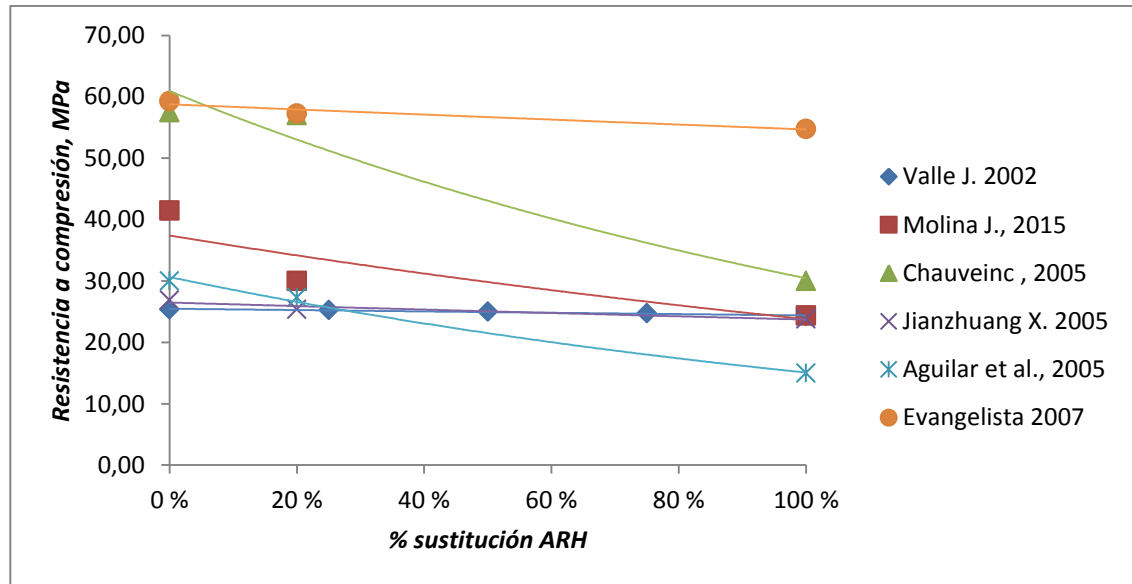


Figura 2.5 Resistencia a compresión en función al porcentaje de sustitución de árido reciclado

Fuente: elaboración propia

En la gráfica anterior (figura 2.5) se observan distintos resultados obteniendo ciertas resistencias en un rango de sustitución de 0% a 100%. El 50% de los estudios presentan resultados admisibles sin presentar variaciones que superen un 5% de resistencia, por lo tanto se puede inferir que la calidad del árido es buena llegando a obtener una resistencia techo, es decir, que la falla del material no se debe a la resistencia del árido sino a la pasta de cemento.

En cambio el otro 50% de los estudios demuestran lo contrario, al observar la línea de tendencia, cuando se sustituyen porcentajes mayores al 50% la resistencia disminuye considerablemente superando el 10%. Aquí la falla no se debe a la pasta cementicia sino que se atribuye a la resistencia del árido reciclado. Sin embargo son estos últimos estudios particularmente frente a propiedades resistentes del hormigón, quienes respaldan las normas internacionales en cuanto al uso del árido reciclado y un % máximo de sustitución.

La dosis y el tipo de cemento condicionan de manera significativa las propiedades del hormigón con áridos reciclados. La cantidad de cemento utilizado en la mezcla tiene relación directa con la resistencia requerida en el hormigón a fabricar. Para mantener las propiedades resistentes de un hormigón se requiere un mayor consumo de cemento, esta cantidad adicional depende directamente de la variable “contenido (%) de árido reciclado” a ocupar. Para una sustitución del 50% de árido reciclado de hormigón, el incremento de cemento oscila entre un 5 y 6% (Navarro, 2014).

Frente a una mayor absorción de agua de las partículas de reciclado de hormigón sería necesario incrementar la cantidad de agua de la mezcla para evitar una disminución

en la trabajabilidad, pero el efecto negativo en este aumento tendría una disminución de la resistencia del hormigón. Por lo tanto, es necesario mantener la misma razón agua/cemento determinadas para las resistencias requeridas incrementando en conjunto el contenido de agua y la cantidad de cemento (Gonzales, 2002).

El tipo de árido que interesa para el presente estudio es el obtenido de probetas de hormigones (ARH). Este tipo de árido se caracteriza por estar compuesto del árido natural y pasta cementicia endurecida adherida a la partícula pétreo, esta característica lo diferencia del árido natural. Presentan formas angulosas, y superficies rugosas y porosas.

2.2.3 Escoria de Fundición de Cobre (EFC)

La escoria de cobre se obtiene como material de desecho a partir del proceso de refinación del cobre, el que se realiza a través de procesos piro-metalúrgicos de minerales sulfurados de cobre, los que previos a la fusión han sido concentrados mediante el proceso de flotación (Orizola, 2006). El proceso piro-metalúrgico es una etapa utilizada para la obtención y refinación de minerales a través de calor (Poblete et al, 2011).

El proceso de fundición de cobre contempla tres etapas generales: La fusión, conversión y refinación. Cada una de ellas conlleva actividades específicas, presentado en la figura 2.6

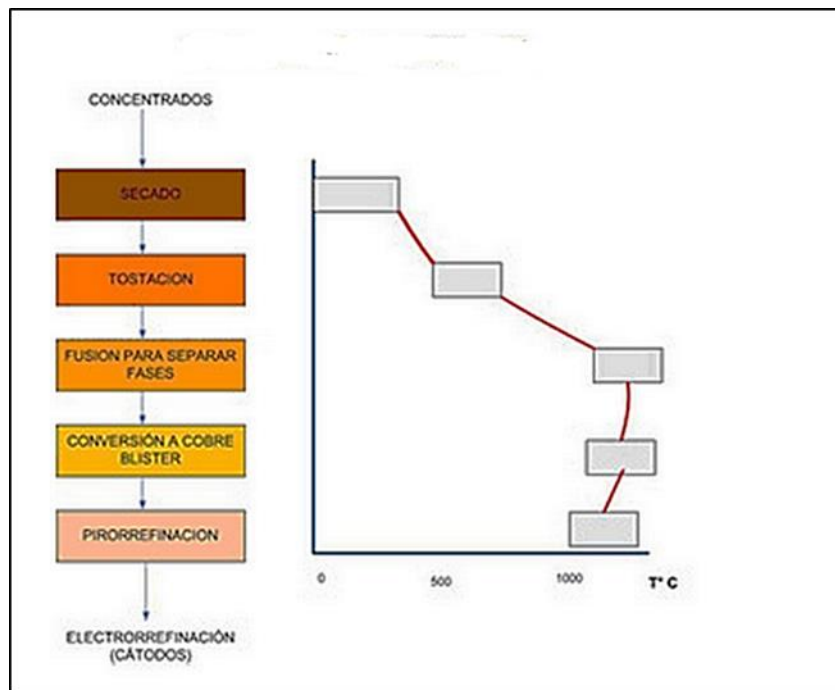


Figura 2.6 Etapas de un proceso de fundición

Fuente: Codelco, 2016

La reacción de producción de mata y escoria se representa de la siguiente manera:



El Concentrado es el material mineral extraído de la naturaleza, con alto contenido de cobre, sílice y otros minerales. Los fundentes son materiales que tienen la capacidad de aumentar las temperaturas dentro del horno y lograr el punto de fusión del concentrado. La energía es obtenida a través de combustibles. Una vez finalizado el proceso de fusión, el resultado entrega una mezcla sulfurada con Cu_2S y FeS (mata), gases (O_2 , SO_2 , N_2 , CO , CO_2 , H_2 , H_2O) y Escorias.

En los procesos de Fusión ya comienzan a generar escorias de descarte con altos contenidos de silicatos de hierro y bajo en porcentajes de cobre. En caso de presentar aún alto contenido de cobre, son sometidas a etapas adicionales de recuperación del metal. La escoria generada en el horno de fusión (HF) es transferida por gravedad a través de canaletas inclinadas, cerrada, refrigerada y envuelta con material refractario. En esta etapa el material (Escoria) quedan con un contenido aproximado de 0,7% de cobre (Codelco, 2016).

Luego son enfriadas bruscamente mediante el uso de agua pulverizada, lo que producto del choque térmico, solidifica el material en pequeños gránulos, quedando finalmente un material con características de vitrificado y amorfo (Codelco, 2016).

2.2.3.1 Características de las EFC

a) Físicas

La forma y el tamaño de las partículas siempre es variable de acuerdo al mecanismo de trituración para depositarlo en los lugares de acopio. Generalmente las partículas se encuentran en tamaños de 1-2". En algunas ocasiones se encuentran en forma de granallas de acuerdo a algún proceso al cual fueron sometidas las escorias.

Estas partículas en su mayoría presentan formas angulosas debido a los procesos de trituración. Son de color negro, textura lisa y poco porosa (Cedoya, 2009).

En cuanto a su granulometría las escorias presentan problemas para cumplir por las bandas granulométricas dispuestas en la NCh 165 Of 2009. Esto se debe a que en su mayoría las escorias presentan un tamaño uniforme de sus partículas, principalmente en el caso de arenas de escoria. Las gravas de escoria obtenidas de la fundición Ventanas no presentan dificultades para cumplir con lo exigido por la NCh 163 (Galvéz, 2014).

La densidad y la absorción de las partículas de escoria de cobre varían de manera significativa en comparación a las partículas de un árido convencional. En la tabla 2.10 se observa los valores que se obtuvieron en una caracterización realizada a escorias obtenidas del escorial de Codelco- Ventanas (Morales y Galvez) y escorias obtenidas del escorial Codelco- El Teniente (Cedoya).

Tabla 2.10 Resultados de características físicas de la EFC

REFERENCIAS	Densidades (kg/m ³)					Absorción %
	real sss	real seca	neta	aparente suelta	aparente compactada	
Gálvez G., 2014 (árido grueso)	3797	3789	3819	2136	2326	0,2
Morales C., 2013 (árido grueso)	3591	3579	3620	2088	2193	0,31
Cedoya P., 2009 (árido fino)	-	4000	-	2236	2372	0,2

Fuente: elaboración propia

De los estudios realizados se observa que las densidades de la escoria en comparación con el árido convencional son mayores. Además la absorción de las escorias es menor a la absorción de la arena convencional, debido a que la superficie de la las escorias es lisa y poco porosa.

b) Químicas

La composición química y las cantidades de cada material que compone las de escorias obtenidas por el laboratorio de calidad de Fundición Ventanas se presentan en la Figura 2.7.

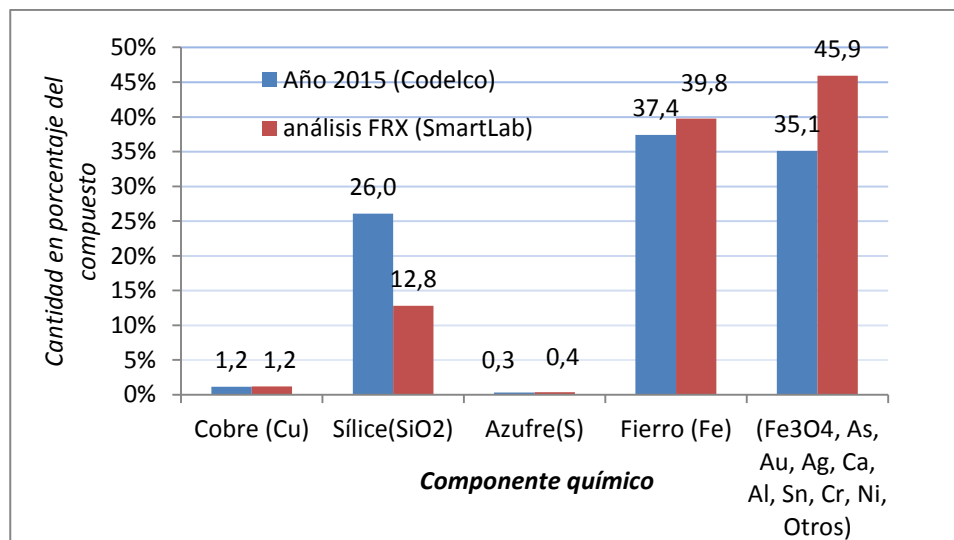


Figura 2.7 Componentes de las escorias Fundición Ventanas

Fuente: elaboración propia

Los valores indicados en la figura 2.7 corresponden al informe del año 2015 y al Reporte de análisis por FRX desarrollado por el Laboratorio Smart Lab, de las muestras del material proveniente del escorial de Codelco Ventanas. Se observa que las escorias están compuestas significativamente de Fe (35-40%) y Si (13-25%) y en bajas cantidades de otros minerales como cobre azufre y otros.

2.2.3.2 Estudios de las EFC

Las escorias han sido estudiadas como materiales sustitutos de áridos y como materiales sustitutos del cemento. En ambos casos los resultados reportados han demostrado un desempeño adecuado con propiedades similar a las de los materiales sustituidos (Cedoya, 2009; Díaz, 2012). Además la utilización de escoria como árido se ha estudiado como reemplazo de material fino y grueso en hormigones (Cedoya, 2009; Morales, 2013; Gálvez, 2014).

Las escorias de fundición de cobre son residuos industriales provenientes de la fundición del cobre, las cuales procesadas en forma de granallas y sometidas a un proceso de molienda adquieren características similares a las de un árido fino (Cedoya, 2009).

Diversos estudios han utilizado las escorias como reemplazo parcial y total del árido fino en la mezcla de hormigón, evaluando sus propiedades resistentes a compresión y flexión. Sus resultados concuerdan y demuestran el aumento en la densidad y la docilidad, compresión y flexión en comparación con un hormigón con áridos naturales (Al Jabri et al, 2002; Moura y Coutinho, 2004; Zapata, 2006).

Las propiedades resistentes del hormigón no se ven afectadas frente a un remplazo parcial del árido grueso por escoria de cobre. El efecto significativo se produce frente a propiedades físicas, aumentando densidad del hormigón (Morales, 2013; Gálvez, 2014).

De acuerdo al contenido de reemplazo de escorias por el árido fino se han estudiado sustituciones que van desde un reemplazo parcial 10% hasta la totalidad del material. Los resultados demuestran que a medida que aumenta el reemplazo parcial de escoria por el árido fino aumenta proporcionalmente las propiedades resistentes (compresión y flexión). Esto sucede hasta un reemplazo parcial del 50%, sobrepasado este valor las propiedades resistentes comienzan a disminuir (Al- Jabri et al, 2002). En la figura 2.8 se presentan los resultados obtenidos por Cedoya, (2009), Gálvez y Morales (2013) sobre la resistencia a compresión en función a la incorporación de escoria de cobre como árido fino y grueso respectivamente.

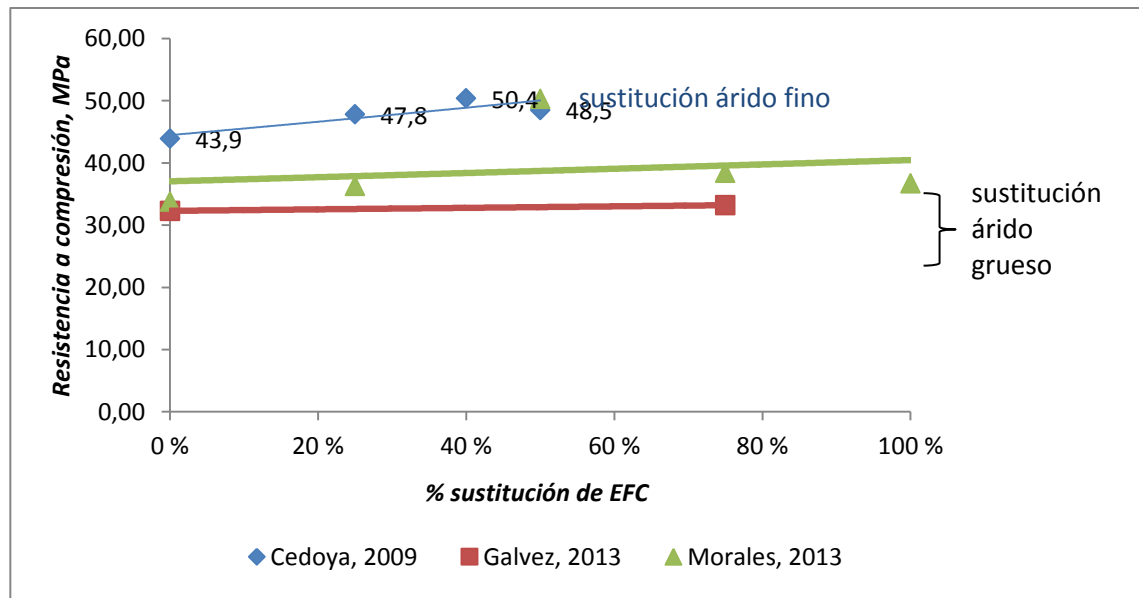


Figura 2.8 Resultados de resistencias a compresión en función al reemplazo de EFC

Fuente: Cedoya, 2009

En la figura 2.8 se observa que en un rango de sustitución (20 y 50%) se logran resistencias superiores a un hormigón patrón, diseñado según una razón A/C 0,45 y reemplazando la arena por escoria, siendo el valor de 40% el que presenta la mayor variación de resistencia (+13%) dentro del rango (Cedoya, 2009). En el caso de las líneas de tendencia que representan las sustituciones de escoria por áridos gruesos se observa que las resistencias se mantienen dentro de un rango que no supera el 5% de variación,

inferiendo que la falla del material no se genera por poca resistencia del árido, sino más bien por falla en la pasta de cemento (Gálvez; Morales; 2013).

No tan solo el contenido de reemplazo del árido fino por escoria es una variable que proporciona variaciones en las propiedades del hormigón. La razón agua/ cemento es una variable que influye en las propiedades mecánicas. Las distintas razones A/C (0,45 y 0,5) utilizadas en los ensayos aplicados a mezclas de hormigón con escorias actúan de manera positiva. Pero es la razón A/C 0,45 quien entrega los mejores resultados resistentes del hormigón (Zapata, 2006; Cedoya, 2009).

El tipo de cemento utilizado para las mezclas de hormigón con escorias de cobre como reemplazo del árido fino, ha sido del tipo siderúrgico (alto contenido de escorias de alto horno) (Cedoya, 2009). También el tipo de cemento puzolánico ha sido utilizado para las mezclas de hormigón con escorias de cobre en reemplazo del árido grueso (Morales, 2013; Gálvez, 2014). Para cada caso en particular, del tipo de sustitución de las escorias por los áridos (fino y grueso) se ha observado buenos resultados en las propiedades del hormigón.

Capítulo III

Metodología de la Investigación

3. Metodología de la Investigación

3.1 Generalidades

De acuerdo al propósito de esta investigación se puede definir y clasificar como una investigación del tipo aplicada al mezclar parte de la teoría y práctico. También se caracteriza por la relación de sus variables y cómo interactúan entre sí, clasificándola como del tipo correlacional. Del mismo modo el solo hecho de definir variables dentro de la investigación y el controlar parte de ellas determina esta investigación como experimental.

Debido a lo anterior el diseño de la presente investigación requiere conocer el comportamiento de las variables a través de la experiencia en laboratorio.

3.2 Secuencia metodológica

Dentro de este capítulo se presenta de forma secuencial las etapas que involucran el desarrollo de toda la investigación y además de encausarla a cumplir los objetivos planteados en un comienzo.

La investigación se describe y desarrolla a través de 4 etapas, una primera etapa como fase exploratoria y propuesta, segunda etapa como fase de formulación, una tercera etapa como fase de programa experimental y finalmente la cuarta etapa como fase de análisis y evaluación. A continuación se describe textual y en la figura 4.1/1 y 4.1/2 se presenta gráficamente.

Etapas I: Fase exploratoria y propuesta: Para esta etapa se comienza trabajando dentro de un planteamiento o propuesta de investigación. A través de una revisión bibliográfica frente a temáticas como los residuos sólidos generados por la industria de la construcción y minería, áridos provenientes de hormigones de demolición y escorias de procesos de fundición de cobre. Se logró determinar el objetivo principal de la investigación y a su vez los objetivos secundarios que permitieron determinar la hipótesis de trabajo para continuar la segunda etapa.

Etapas II: Fase de formulación: A través de la hipótesis planteada se presentan los antecedentes bibliográficos entorno al tema central de la investigación, específicamente respecto a la utilización de los áridos reciclados de hormigón y de escoria de cobre y sus características; además de las propiedades del hormigón.

Etapas III: Programa experimental: Para el desarrollo de esta etapa se considera la definición y clasificación de las variables dependientes, independientes y de control o constantes. Además la caracterización de los áridos convencionales, ARH y EFC a utilizar para la fabricación de mezclas de hormigón. También se presentan los ensayos para evaluar las propiedades del hormigón según lo especificado por la normativa chilena vigente. Esta etapa permite el desarrollo de un diseño factorial a través de los ítems que contempla.

Etapa IV: Análisis y evaluación: Frente al trabajo en el laboratorio y una vez finalizados los ensayos correspondientes se procede al análisis de cada uno de ellos, a través de análisis estadísticos y gráficas correlacionales de las variables en estudio. Finalmente se presentan las evaluaciones finales y conclusiones que permiten responder a los objetivos planteados y reafirmar o refutar la hipótesis de trabajo planteada.

En las siguientes figuras 3.1 y 3.2, se presenta de forma esquemática la secuencia metodológica de este estudio.

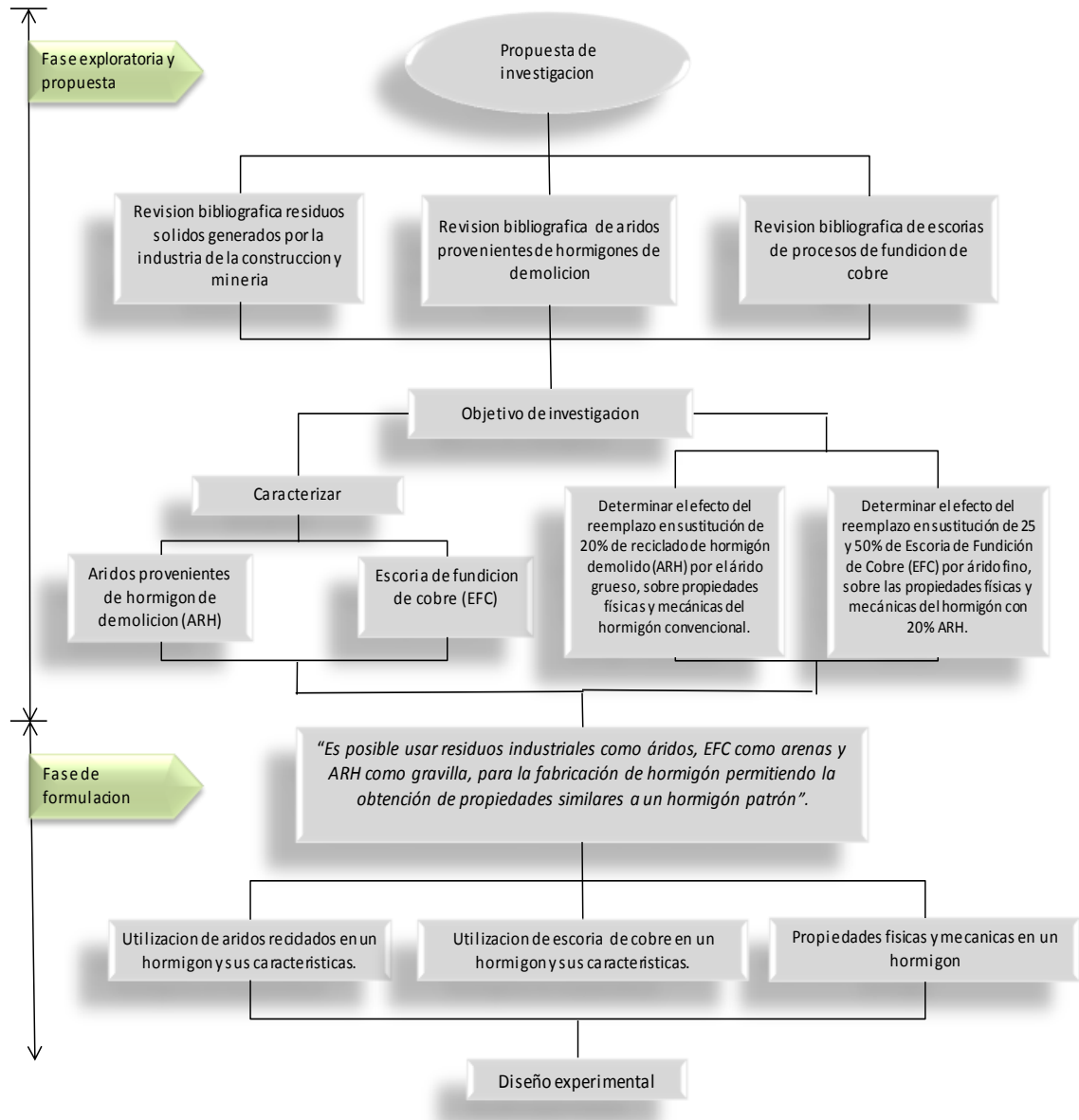


Figura 3.1 Esquema metodológico, parte 1

Fuente: elaboración propia

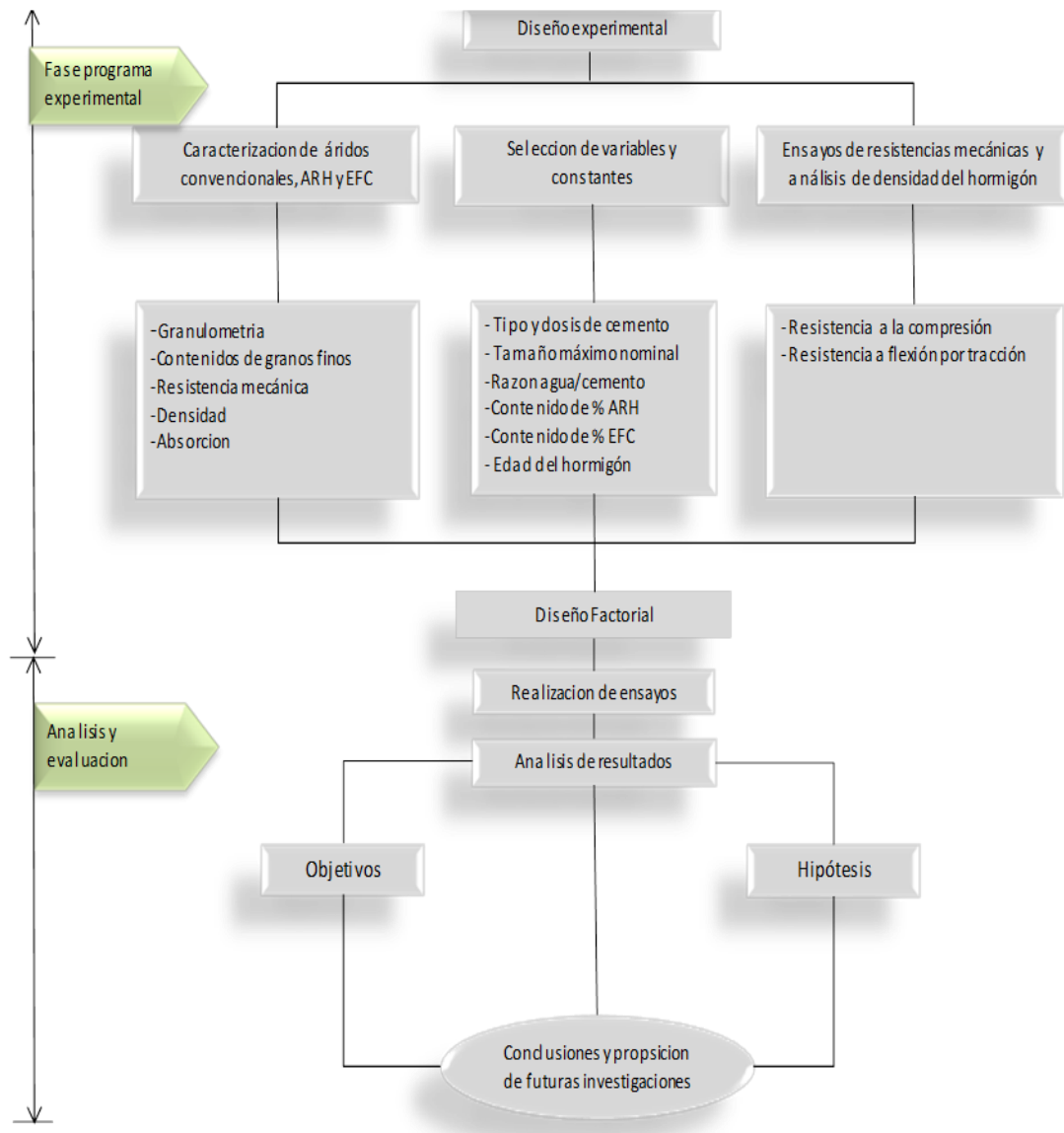


Figura 3.2 Esquema metodológico, parte 2

Fuente: elaboración propia

3.3 Diseño experimental

3.3.1 Generalidades

Para determinar las variables como Resistencia de dosificación y razón agua/cemento (A/C), es necesario previamente determinar el grado de hormigón a desarrollar.

Para la presente investigación se determina una resistencia mecánica de diseño de 20 MPa u hormigón grado H20.

3.3.2 Variables y/o constantes de la investigación

3.3.2.1 Tipo de Cemento

El tipo de cemento a utilizar para la confección de todas las mezclas es Portland Puzolánico grado corriente, factor que se considera constante. Este tipo de cemento es generalmente utilizado para la confección de hormigones en el país y de fácil acceso.

3.3.2.2 Tamaño máximo nominal del árido (Dn)

Este factor se considera según las condiciones del hormigón a fabricar. El tamaño máximo a utilizar es 20mm.

3.3.2.3 Razón agua/ cemento

La razón A/C se determinó de acuerdo al procedimiento 3 de la NCh 170 Of 85. Considerando una resistencia media requerida (f_r) de 25 MPa y grado del cemento corriente, determinándola según diversos factores:

- Resistencia especificada
- Nivel de confianza
- Y condiciones para la fabricación de la mezcla.

El valor de la razón A/C empleada para la dosificación se presenta en la tabla 3.2.

3.3.2.4 Edad del hormigón

El ensayo de resistencias a compresión y tracción por flexión se determina según lo especificado en la NCh 170 Of 85 que considera la edad a los 28 días. Esta investigación plantea un ensayo adicional a los 7 días para conocer el comportamiento de los hormigones en estudios a edades tempranas.

3.3.2.5 Porcentaje de reemplazo de áridos

Para el desarrollo de la investigación se plantea el uso de 3 tipos de mezclas con distintos porcentajes de reemplazo de áridos y una mezcla patrón con áridos convencionales, descrito en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Definición de tipos de mezclas para confección de hormigón

TIPO MEZCLA	DESCRIPCIÓN
PATRÓN	Contiene solo áridos convencionales, gruesos y finos.
MEZCLA A	Contiene árido fino convencional, y sustitución del 20% del árido grueso por ARH.
MEZCLA B	Sustitución del 25% de arena por EFC, y sustitución del 20% del árido grueso por ARH.
MEZCLA C	Sustitución del 50% de arena por EFC, y sustitución del 20% del árido grueso por ARH.

Fuente: elaboración propia

Según lo determinado en la tabla 3.1 las mezclas A, B y C contienen un 20% de reemplazo de ARH grueso (tam. máx. 20mm). La elección de este porcentaje se determinó tras analizar diversos estudios, y normas internacionales en los que sus resultados demuestran que este valor genera leves variaciones negativas en propiedades físicas y mecánicas. Además su reemplazo como árido grueso presenta mejores propiedades resistentes que árido fino. Finalmente, el reemplazo de ARH con las características descritas presenta resultados óptimos, sin mayores variaciones en las propiedades físicas y mecánicas de los hormigones.

Las mezclas B y C contienen un 25 y 50% de reemplazo de EFC como árido fino respectivamente (tam. máx. 4,75mm). Como primera descripción, este reemplazo es aplicado a la mezcla A, de acuerdo a lo planteado en los objetivos de esta investigación. La elección de este rango de sustitución se determinó luego de considerar estudios relacionados al uso de EFC como reemplazo de áridos convencionales en mezclas de hormigones. Los resultados de los estudios demuestran que con un reemplazo del 25% se comienzan a observar leves variaciones en las propiedades físicas y mecánicas del hormigón. Y con reemplazos mayores a un 50% aproximadamente comienzan a disminuir dichas propiedades. Lo que respecta a su tamaño, los estudios demuestran mejores propiedades utilizando la EFC como árido fino a diferencia de su uso como grueso.

3.3.3 Factorial de ensayo

Considerando los objetivos de la investigación y la hipótesis planteada para el desarrollo de esta investigación, se definieron las variables para el desarrollo de la fase experimental y el diseño factorial. En la tabla 3.2 se presenta el diseño factorial para desarrollar las muestras de hormigón incluyendo las variables de la investigación.

Tabla 3.2 Diseño factorial de ensayo para muestras de hormigón

Variables	Datos							
Tipo de cemento	Portland Puzolánico grado corriente							
Tamaño máx. Nominal	20 mm							
Razón agua/cemento	0,55 –resistencia especificada 20 Mpa.							
Tipo de mezcla de hormigón	Patrón		Mezcla A		Mezcla B		Mezcla C	
% ARH	0%		20%		20%		20%	
% EFC	0%		0%		25%		50%	
Edades del Hormigón (días)	7	28	7	28	7	28	7	28
Nomenclatura de ensayos	fc, ft	fc, ft	fc, ft	fc, ft	fc, ft	fc, ft	fc, ft	fc, ft

Fuente: elaboración propia

3.3.2 Caracterización de áridos

3.3.2.1 Generalidades

En la presente investigación se realizó la caracterización correspondiente, para determinar las propiedades que deben cumplir los áridos para la fabricación de hormigones, granulometría, densidad y absorción. Además de ensayos de resistencia (desgaste de Los Ángeles) y contenido de finos.

Los áridos convencionales utilizados para esta investigación provienen de la planta de áridos Clonovia.

También se utilizó árido reciclado de hormigón (ARH) y escoria de fundición de cobre (EFC). Estos áridos debieron pasar por un proceso de molienda y selección para lograr obtener el árido requerido.

El origen del reciclado de hormigón fue adquirido del laboratorio de hormigones de la Universidad de Valparaíso. Las probetas de hormigón en desuso fueron escogidas para la demolición. Se utilizó un combo de 12 lbs, para una primera etapa de demolición. En esta primera etapa se logró obtener en gran cantidad partículas de tamaño mayores a 40mm (figura 3.3).



Figura 3.3 primera etapa demolición de ARH

Fuente: elaboración propia

Para una segunda etapa de demolición se utilizó una masa de 65 kg en caída libre (figura 3.4) generando una trituration por impacto, obteniendo finalmente un tamaño máximo de 20mm establecido para esta investigación.



Figura 3.4 Método de demolición, ARH y EFC

Fuente: elaboración propia

La escoria de cobre fue extraída directamente del botadero de Codelco- División Ventana. Este material se encuentra en tamaños de 1 a 2" aproximadamente, por lo que fue necesario emplear un método de trituración de la partícula para obtener un tamaño que pase por el tamiz de 4,75 mm. Se empleó el mismo método de trituración que se realizó para triturar el ARH (figura 3.4). De esta manera se pudo lograr un tamaño similar al de un árido fino.



Figura 3.5 EFC tamaño menor 4,75 mm

Fuente: elaboración propia

3.3.2.2 Normativa para la caracterización de los áridos

Para los ensayos correspondientes a los áridos a emplear en la fabricación de hormigones se utilizaron el conjunto de Normas Chilenas que establecen las propiedades que deben cumplir los áridos para las mezclas.

Las Normas Chilenas empleadas son las siguientes:

- NCh 163.n 2013. “Áridos para morteros y hormigones- Requisitos”
- NCh 164.n 2009. “Áridos para morteros y hormigones- Extracción y preparación de muestras”.
- NCh 165 Of 2009. “Áridos para morteros y hormigones- Tamizado y determinación de la granulometría”.
- NCh 1117 Of 2010. “Áridos para morteros y hormigones- Determinación de las densidades real y neta y la absorción de agua para gravas”.
- NCh 1223 Of 1977. “Áridos para morteros y hormigones- Determinación del material fino menor que 0,080mm”.
- NCh 1239.n 2009. “Áridos para morteros y hormigones- Determinación de las densidades real y neta y la absorción de agua para arenas”.

- NCh 1369.n 2010. "Áridos- Determinación del desgaste de las gravas- Método de la Maquina de Los Ángeles".

3.3.2.3 Granulometría de los áridos

El tamaño máximo nominal del árido empleado para esta investigación es 20mm, tanto para gravas convencionales como para el ARH.

En las siguientes figuras se presentan las curvas granulométricas de los tipos de áridos empleados en esta investigación para la confección de hormigones. Las gráficas presentan las bandas granulométricas establecidas en la NCh 163.n2013.

En las figuras 3.6 y 3.7 se presentan las curvas de áridos gruesos, gravilla y ARH.

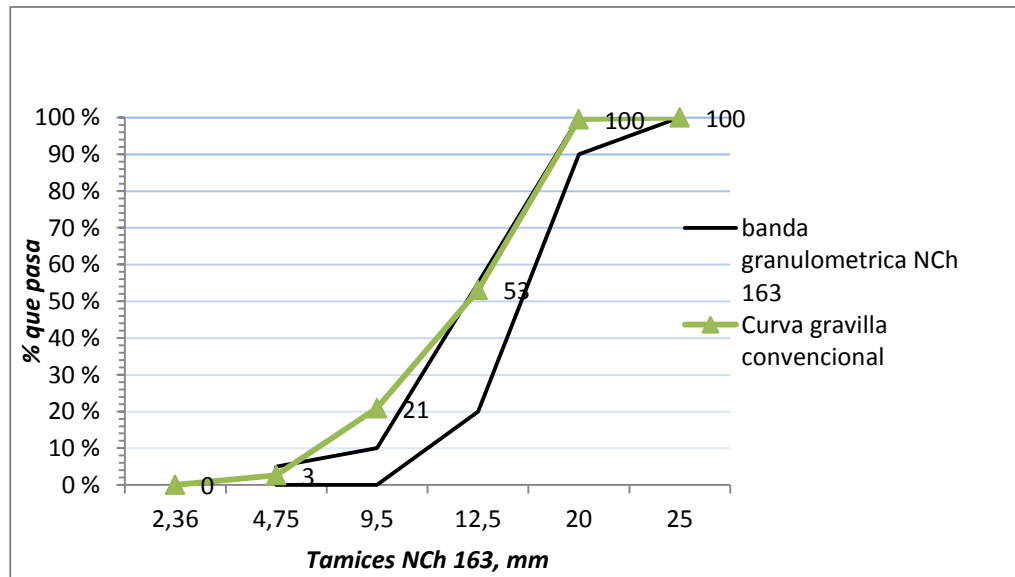


Figura 3.6 Curva granulométrica gravilla convencional

Fuente: elaboración propia

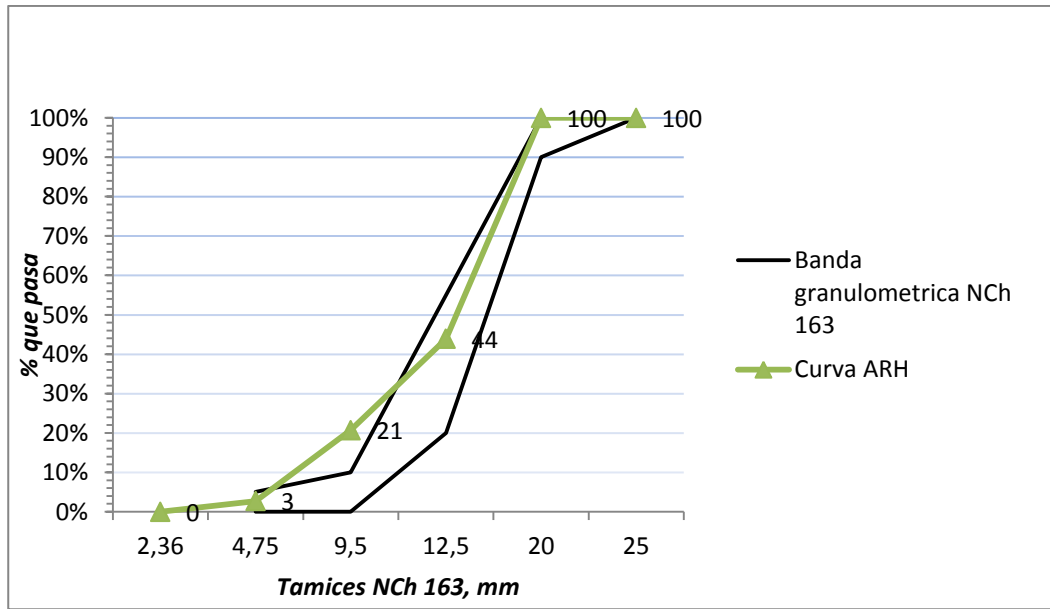


Figura 3.7 Curva granulométrica ARH

Fuente: elaboración propia

En las figuras 3.8 y 3.9 se presentan las curvas granulométricas de arena convencional y EFC utilizado como fino respectivamente.

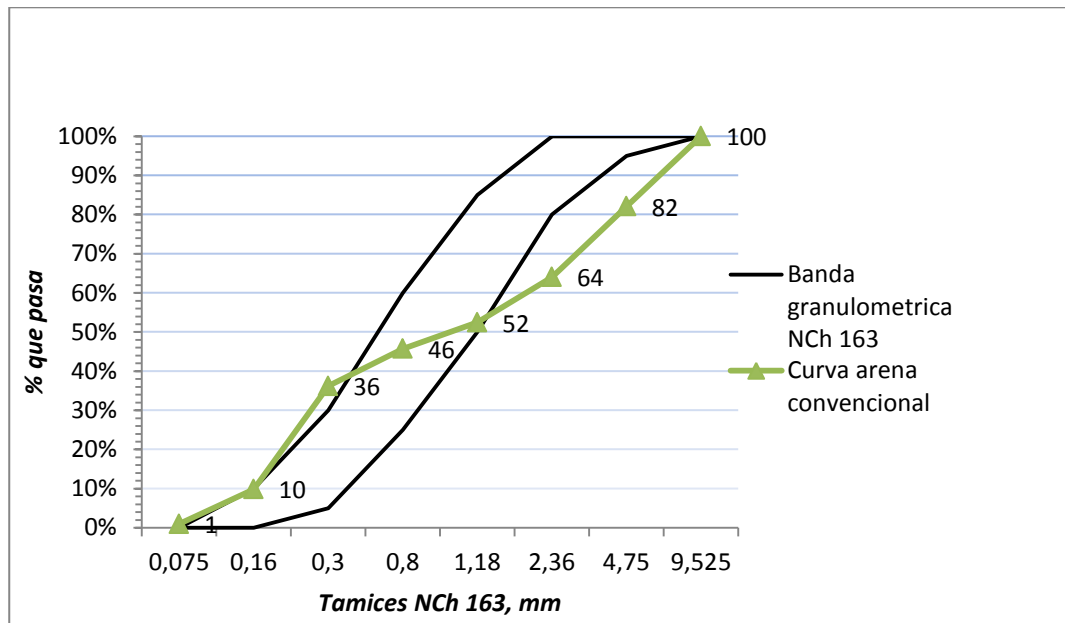


Figura 3.8 Curva granulométrica arena convencional

Fuente: elaboración propia

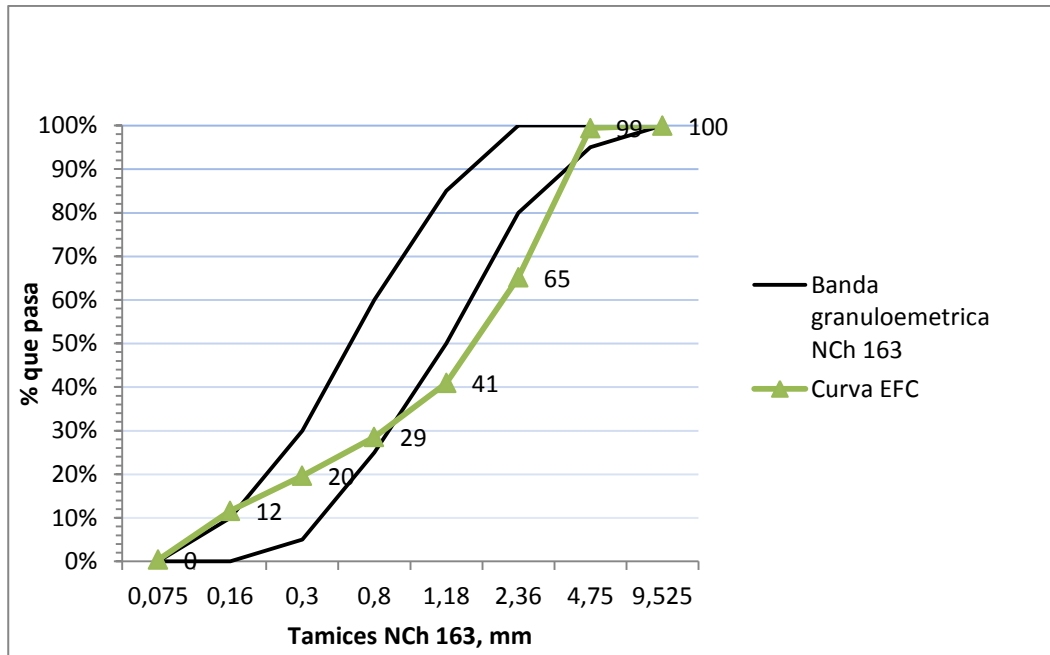


Figura 3.9 Curva granulométrica EFC

Fuente: elaboración propia

En las siguientes figuras se presentan las curvas granulométrías de áridos combinados. En la figura 3.10 se observa la curva obtenida de la combinación de áridos convencionales arena y grava.

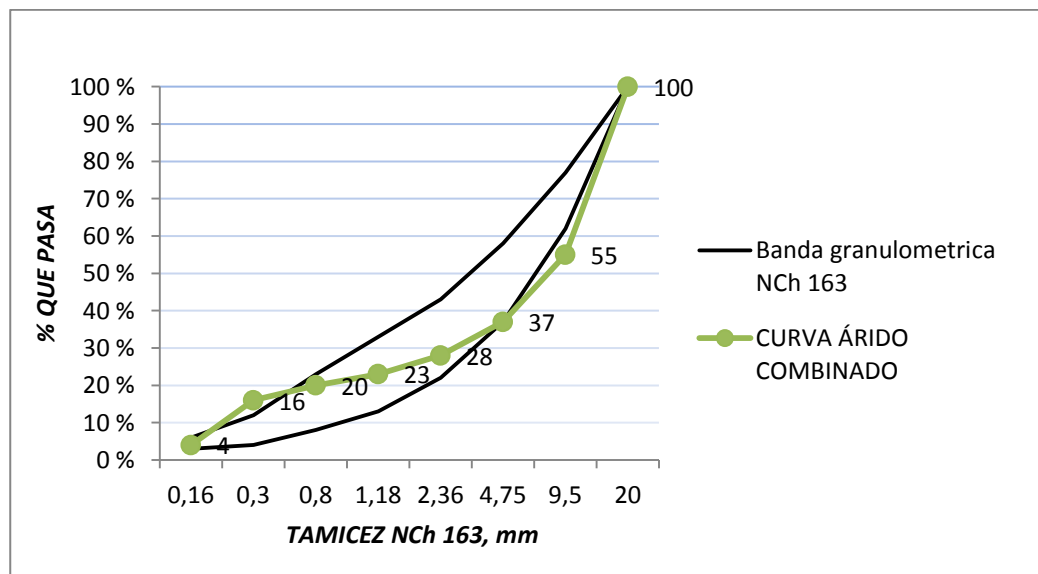


Figura 3.10 Curva áridos combinados grava- arena convencional

Fuente: elaboración propia

La grafica anterior muestra la granulometría corregida de áridos combinados determinando la proporción de áridos (57% de árido grueso y 43% de árido fino) a emplear en la fabricación de hormigones.

En las siguientes figuras se presentan las curvas de áridos combinados de las distintas mezclas a fabricar, con el uso de ARH y EFC.

La figura 3.11 presenta la curva granulométrica de la mezcla A (H-AR 20%-0%), incorporando 20% de reciclado de hormigón como gravilla a la mezcla de áridos convencionales.

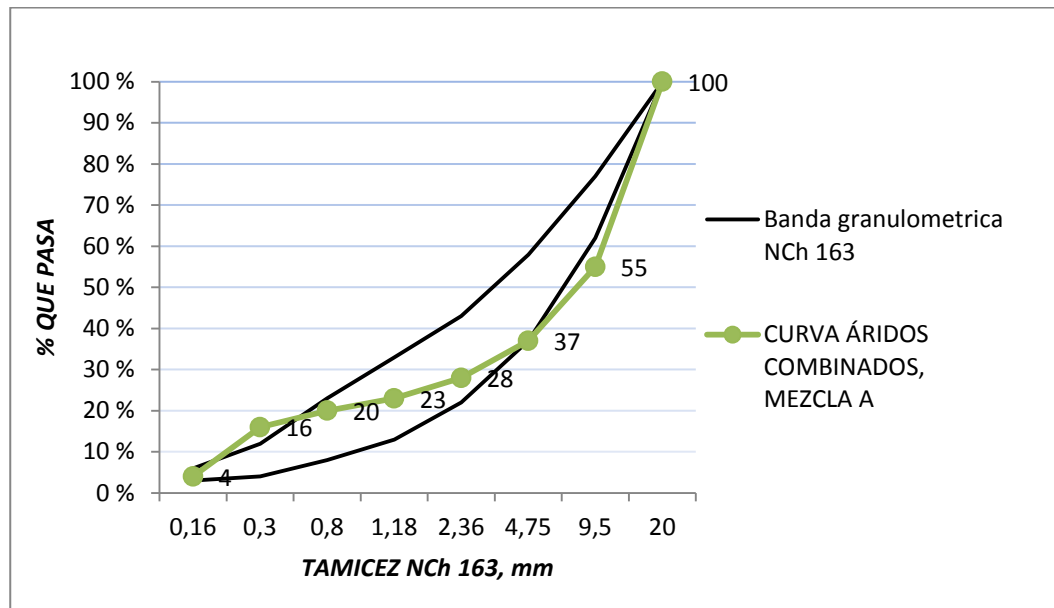


Figura 3.11 Curva árido combinado Mezcla A

Fuente: elaboración propia

La figura 3.12 se observa la curva granulométrica de la mezcla B (H-AR 20%-25%), incorporando a la mezcla A un 25% de Escoria de Cobre (EFC) como árido fino.

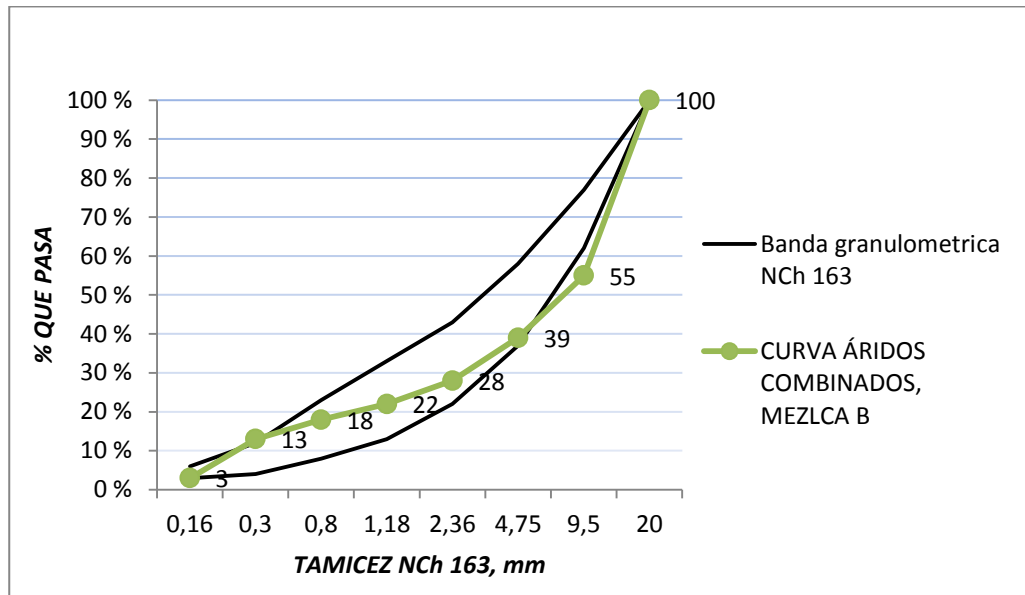


Figura 3.12 Curva árido combinado Mezcla B

Fuente: elaboración propia

De igual manera en la figura 3.13 se determina la curva granulométrica para la mezcla C (H-AR 20%-50%), incorporando 50% de Escoria de Cobre (EFC) como fino a la mezcla A.

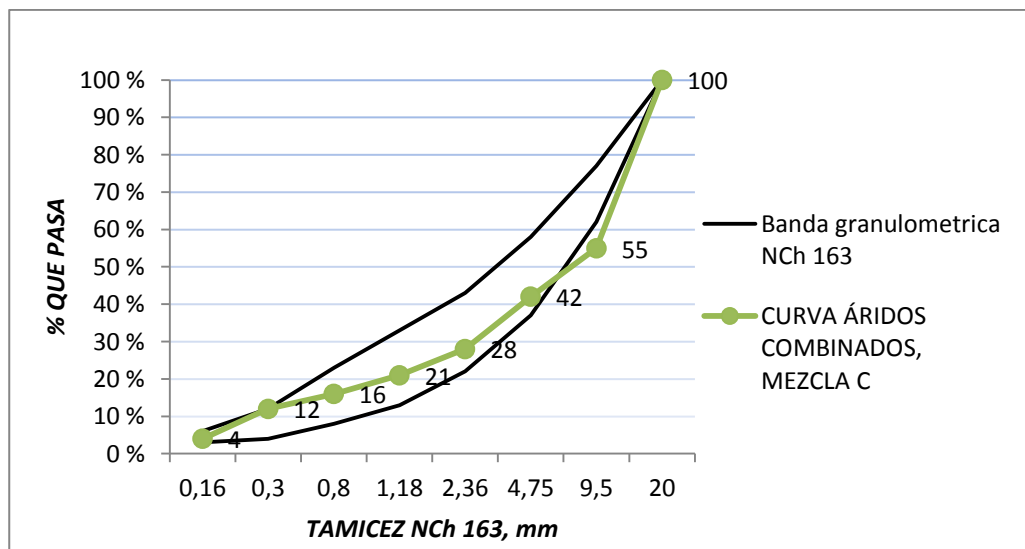


Figura 3.13 Curva árido combinado Mezcla C

Fuente: elaboración propia

Las curvas observadas en las gráficas anteriores indican que las EFC y ARH describen una curva muy similar a la presentada por las bandas granulométricas que establece la NCh 163n 2013.

Las tablas de resultados granulométricos para cada gráfica se adjuntan en el capítulo 8 desde la tabla 8.1 a la 8.11 de los anexos, se presenta toda la información necesaria de los valores obtenidos en el ensayo de granulometría.

3.3.2.4 Densidad de áridos

a) Densidad árido grueso, gravilla- ARH (tam. máx. 20mm)

La figura 3.14 presenta la comparación de densidades entre la gravilla y reciclado de hormigón.

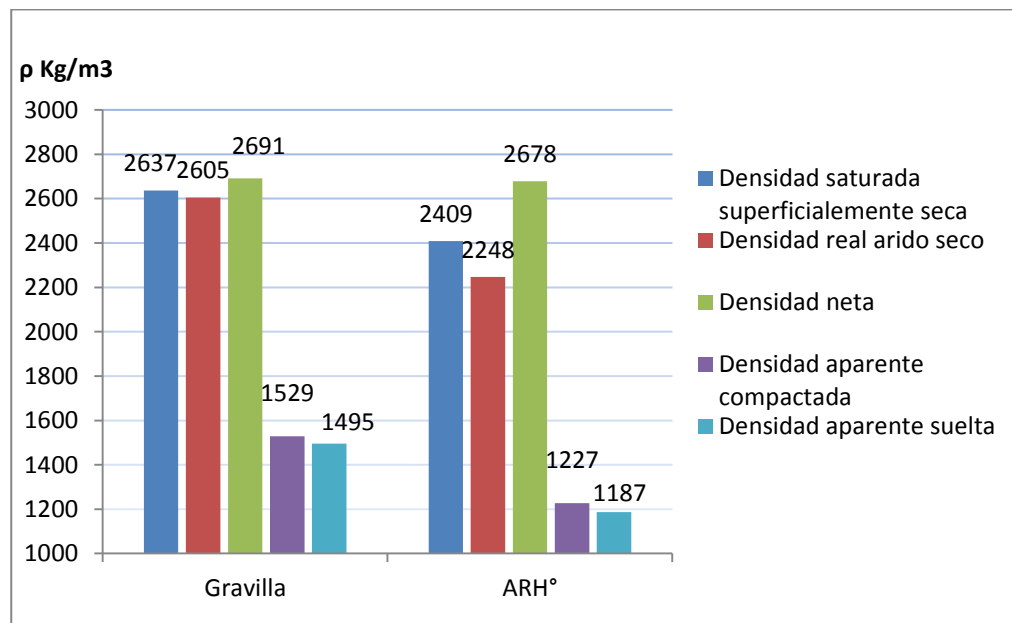


Figura 3.14 Grafica comparativa de densidad de áridos gruesos

Fuente: elaboración propia

El árido reciclado de hormigón (ARH) presenta una disminución en sus densidades en comparación con el árido convencional. La mayor variación se presenta en la densidad aparente suelta donde el ARH disminuye en un 21%. Y la menor diferencia porcentual se observa en la densidad neta donde el ARH disminuye solo un 0,5%. Estos resultados, según la bibliografía consultada en el capítulo anterior, concuerdan debido a las características que presenta el ARH, en donde la disminución de la densidad se debe a la

película de mortero que envuelve el árido en toda su superficie, esta película disminuye el volumen real de la partícula de árido y al ser porosa disminuye su peso.

b) Densidad de árido fino, arena- EFC

La figura 3.15 presenta el resultado del ensayo de densidades entre la arena y EFC.

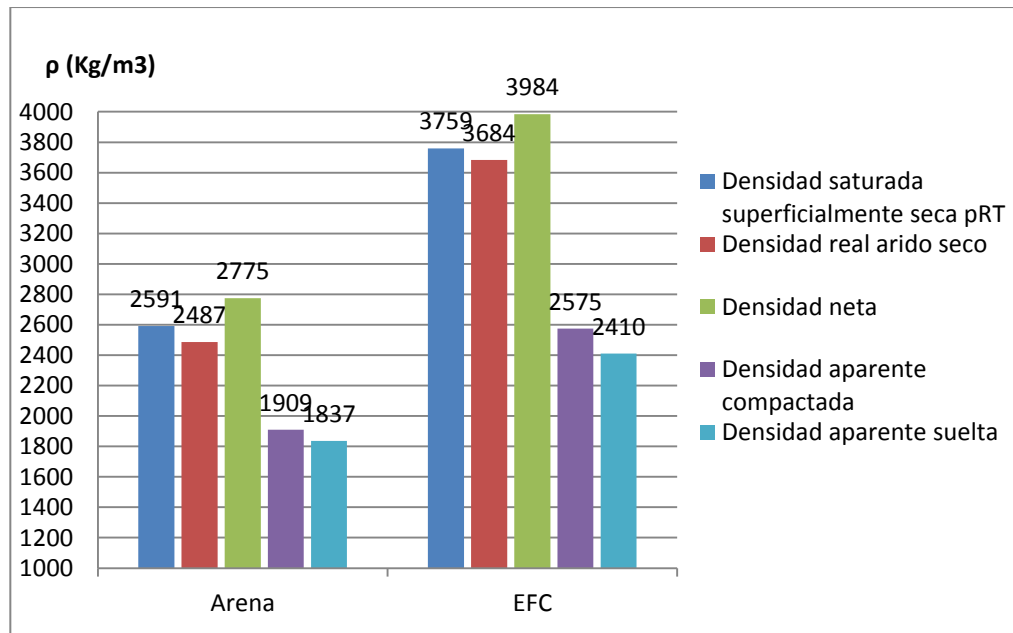


Figura 3.15 Grafica comparativa de densidad de áridos finos

Fuente: elaboración propia

En la figura 3.15 se observa que la partícula de Escoria de Cobre (EFC) fina presenta mayor densidad que el arena convencional. Generalmente las mayores variaciones se observan en la densidad superficialmente seca, seca y neta, donde la EFC presenta entre 30% a 32% mayor peso específico. Y la menor variación se observa en la densidad aparente suelta. Los estudios consultados y según los resultados, este aumento se debe a la composición química de la partícula de EFC, mencionado en el punto 2.2.3.1 del capítulo anterior. El elemento químico que mayor % presentan las partículas de EFC es el hierro (40%) de su composición, lo cual atribuye a un aumento del peso específico.

3.3.2.5 Absorción de áridos

En las tablas 3.3 y 3.4 se presentan los resultados obtenidos de la absorción de los áridos ensayados.

El ARH presenta casi un 6% de absorción mayor que un árido grueso convencional (Tabla 3.3), como ya se ha mencionado anteriormente esta desventaja se le atribuye al mortero adherido que presenta la partícula. Según valores entregados en antecedentes bibliográficos la absorción de este material oscila en un rango 4%-9% app. Además la absorción del árido reciclado de hormigón está relacionada con la procedencia y calidad del hormigón demolido.

Tabla 3.3 Absorción de áridos gruesos, gravilla y ARH

Absorción áridos gruesos		
		%
Gravilla	ARH°	DIFERENCIA
1,22	7,14	5,92

Fuente: elaboración propia

La tabla 3.4 presenta la absorción que posee la Escoria de Cobre con una diferencia de 1% menor que un árido fino convencional. Generalmente este material presenta absorciones menores debido a la superficie lisa que se observa en la partícula.

Tabla 3.4 Absorción de áridos finos, arena y EFC

Absorción áridos finos		
		%
Arena	EFC	DIFERENCIA
1,40	0,4	1,0

Fuente: elaboración propia

3.3.2.6 Contenido de finos

En la figura 3.16 y 3.17 se presentan los resultados del ensayo para determinar el contenido de material fino que pasa por los tamices 0,08 mm, de áridos finos y gruesos.

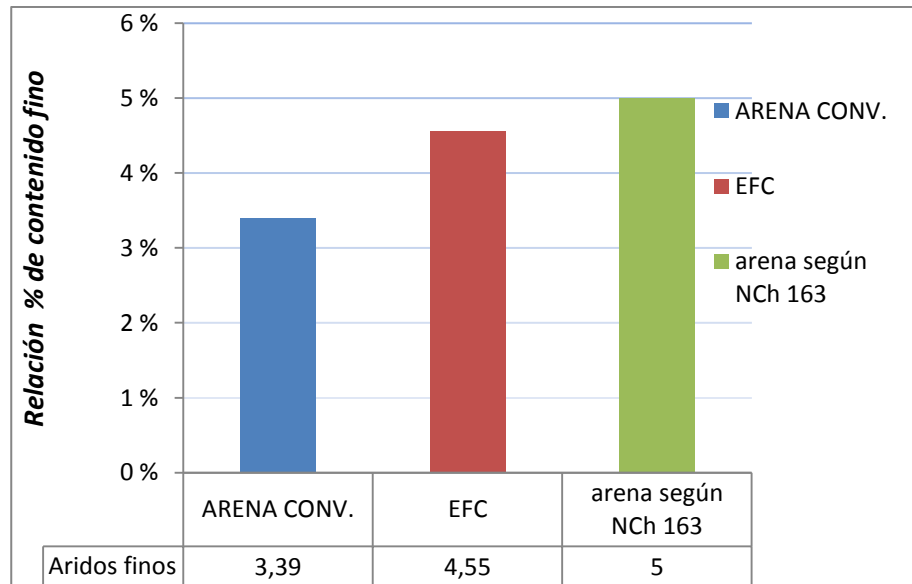


Figura 3.16 Contenido de finos

Fuente: elaboración propia

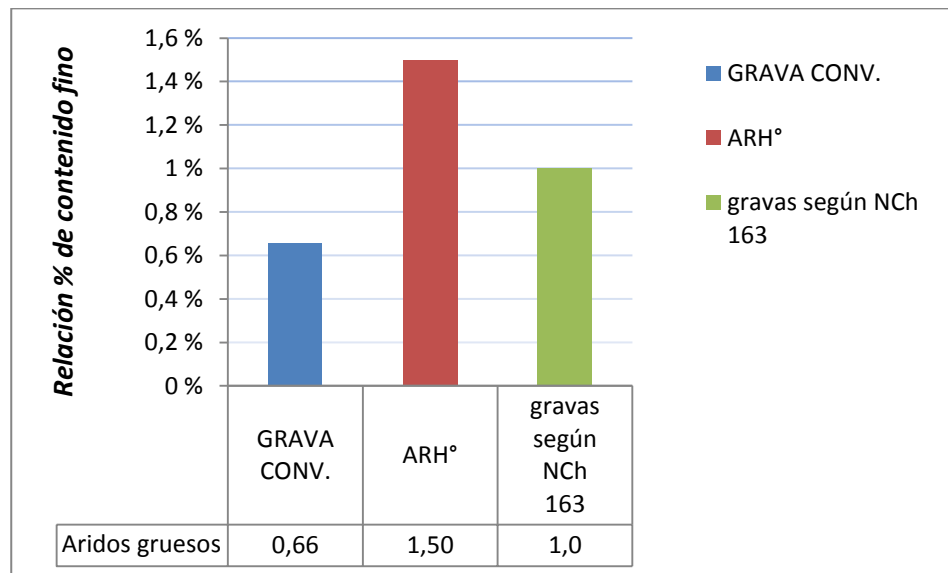


Figura 3.17 Contenido de finos

Fuente: elaboración propia

En las gráficas anteriores se observan los porcentajes obtenidos para cada tipo de árido.

La EFC presenta mayor contenido de fino, esto se atribuye al proceso de trituración del material para poder lograr un material fino menor de 5 mm generando gran cantidad de polvo fino. Aun así cumple con los límites establecidos por la NCh 163n 2013.

El ARH presenta un % mayor al límite aceptable por la normativa, este 0,5% más se debe al mortero adherido a la partícula que se desprende al momento de ser manipulado el material.

3.3.2.7 Resistencia mecánica de áridos, método desgaste de Los Ángeles

El ensayo fue realizado según el procedimiento establecido en la NCh 1369.n 2010 y consistió en analizar una muestra de reciclado de hormigón y escoria de cobre (tamaño máximo 20mm). Pese a utilizar la escoria de cobre como árido fino para esta investigación, se procedió a realizar de igual manera este ensayo a una muestra del material antes del proceso de trituración.

En la gráfica presente en la figura 3.18 se observa el resultado obtenido del ensayo desgaste de los Ángeles, realizado al reciclado de hormigón y Escoria de Cobre.

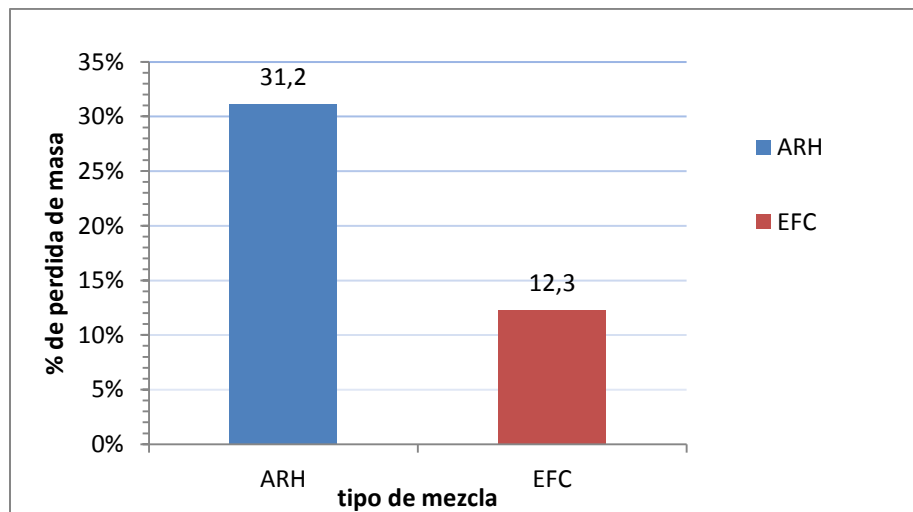


Figura 3.18 Desgaste de los Ángeles

Fuente: elaboración propia

El ARH presenta un valor mayor de desgaste debido al mortero adherido a la partícula, esta menor resistencia se puede observar al momento de la manipulación del material, generándose fácilmente material fino de la partícula. Por el contrario la Escoria de Cobre presenta una mayor resistencia debido principalmente al % de hierro que presenta en su composición.

3.3.3 Dosificación

3.3.3.1 Generalidades

La dosificación se realizó a través del método establecido por la norma Chilena 170 Of 85. "Hormigones- Requisitos Generales".

La determinación de las proporciones de materiales se realiza a través de la siguiente formula:

$$C + W + \mu + G + A = 1000 \text{ (lts)}$$

- C: volumen real de cemento en m^3 que es igual a la masa del cemento kg dividido por la densidad real del cemento en kg/m^3 .
- W: volumen de agua de amasado en m^3 necesaria para la docilidad requerida, esta se obtiene según la tabla
- μ : volumen de aire atrapado o intencionalmente incorporado en m^3 , que puede ser estimado según la tabla
- G: volumen real de la grava en m^3 , que es igual a la masa de la grava en kg dividida por la densidad real de la grava en kg/m^3 , con ambos valores correspondientes al estado saturado de superficie seca, o al estado seco.
- A: volumen real de la arena en m^3 , que es igual a la masa de la arena en kg dividida por la densidad real de la arena en kg/m^3 , con ambos valores correspondientes al estado saturado de superficie seca, o al estado seco.

3.3.3.2 Determinación de materiales

a) Dosis de agua

La cantidad de agua se determina a través de la tabla 3.5 considerando el tamaño máximo nominal del árido y según asentamiento de cono. El asentamiento de cono se determinó según lo establecido en la NCh 170. Para esta investigación se considerará un rango de asentamiento $\geq 3 \text{ cm}$ y $\leq 10 \text{ cm}$. Dentro de este rango se consideran hormigones sin armar según lo establecido en la tabla 5 de la NCh 170 of 85.

b) Volumen de aire atrapado (μ)

El volumen de aire atrapado se determina a través de la tabla 13 de la NCh 170 of 85, considerando el tamaño máximo nominal del árido (tabla 3.5).

Tabla 3.5 Volumen estimado de agua de amasado y aire atrapado, m³

Volumen estimado de agua de amasada (m³)							
Tamaño nominal mm	máximo	Docilidad según descenso de cono, cm				Volumen medio de aire atrapado, M³	
		0-2	3-5	6-9	10-15		16
63		0,135	0,145	0,155	0,165	0,170	0,003
50		0,145	0,155	0,165	0,175	0,180	0,005
40		0,150	0,160	0,170	0,180	0,185	0,010
25		0,170	0,180	0,190	0,200	0,205	0,015
20		0,175	0,185	0,195	0,205	0,210	0,020
12		0,185	0,200	0,210	0,220	0,230	0,025
10		0,190	0,205	0,215	0,230	0,240	0,030

Fuente: Norma NCh 170 of 85.

c) Dosis de cemento

$$Cemento = \frac{Dosis\ de\ agua}{Razon\ A/C}$$

$$Cemento = \frac{185}{0,55} = 336,36\ (kg)$$

d) Determinación de la proporción de áridos, lts

$$G + A = 675\ (lts)$$

$$Gravilla\ 57\% * 675 = 388\ (lts)$$

$$Arena\ 43\ \% * 675 = 287\ (lts)$$

e) Determinación de la proporción de áridos, kg

$$Gravilla = 388\ (lts) * 2605\ \frac{(kg)}{(m^3)} = 1010,7\ (kg)$$

$$Arena = 287\ (lts) * 2556\ \frac{(kg)}{(m^3)} = 734\ (kg)$$

La tabla 3.6 presenta el resumen de la dosificación del tipo de mezcla en kg.

Tabla 3.6 Dosificación para 1m³ de hormigón, kg

DOSIFICACION EN Kg				
AMASADA PARA 1 m ³ DE HORMIGON	TIPO DE MEZCLA			
	PATRÓN	MEZCLA A	MEZCLA B	MEZCLA C
COMPONENTES	kg/m ³			
Cemento	336	336	336	336
Agua	185	185	185	185
Arena	744	744	557	372
Gravilla	1023	819	819	819
ARH°	0	188	188	188
EFC	0	0	261	521
TOTAL (kg)	2289	2272	2346	2421

Fuente: elaboración propia

En la tabla 3.6 se determinan las proporciones de materiales para cada mezcla a preparar. Esta dosificación se encuentra sin corrección de humedad de los áridos.

Las dosificaciones con correcciones de humedad de los áridos y las proporciones de materiales de las mezclas para la fabricación de hormigones, se encuentran tabulados en los anexos al final de la investigación.

3.3.4 Preparación de las mezclas de hormigón

Las mezclas son preparadas en las dependencias del laboratorio de la Escuela de Construcción de la Universidad de Valparaíso, utilizando las herramientas y maquinarias del recinto verificando que se encuentren en buen estado.

Además se debe procurar mantener en buenas condiciones los materiales que serán utilizados, teniendo especial cuidado en el acopio de áridos y cemento.

3.3.5 Probetas para las muestras de hormigón

Probetas cubicas de 15 cm de arista. Probetas para la realización del ensayo a compresión.

Probetas prismáticas de 15 x 15 x 55 cm. Probetas para la realización del ensayo a flexión por tracción.

Para la confección de las probetas se utilizarán los moldes estandarizados según las dimensiones de probetas a confeccionar presentes en la figura 3.19.

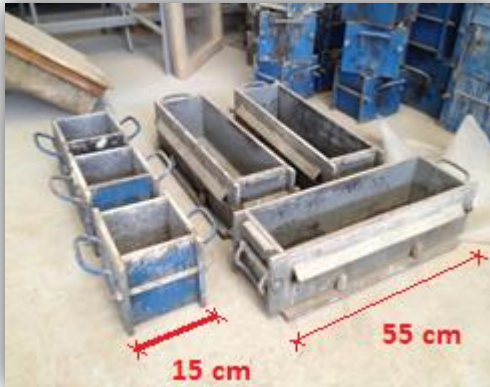


Figura 3.19 Moldes estandarizados, para confección de probetas

Fuente: elaboración propia

3.3.6 Ensayos de resistencias mecánicas

3.3.6.1 Ensayo a compresión

El procedimiento de ensayo se lleva a cabo con lo especificado a través de la Norma Chilena 1037.n 2009. “Ensayo a compresión de probetas cubicas y cilíndricas”. La maquinaria requerida para este ensayo se debe encontrar en las condiciones adecuadas que indica la norma.

El ensayo a rotura por compresión se realizó una vez terminado el periodo de curado a las edades determinadas anteriormente (7 y 28 días).



Figura 3.20 Esquema de ensayo a compresión

Fuente: elaboración propia

3.3.6.2 Ensayo a tracción por flexión

Este ensayo se desarrolló a través del procedimiento establecido en la Norma Chilena 1038.n 2009. “Ensayo de tracción por flexión”. La maquinaria para desarrollar este ensayo debe cumplir con las condiciones que establece la norma.

El ensayo se realizó luego del proceso de curado de las probetas a las edades de 7 y 28 días.



Figura 3.21 Esquema del ensayo a flexotracción

Fuente: elaboración propia

Capítulo IV

Desarrollo y Análisis de resultados

4. Desarrollo y análisis de resultados

4.1 Generalidades

El siguiente capítulo presenta un análisis de los resultados obtenidos en laboratorio de las propiedades en estado fresco y endurecido del hormigón. Todos los ensayos aplicados a hormigones se realizaron de acuerdo a lo especificado por las Normas Chilenas vigentes.

En primer lugar se presenta los resultados obtenidos del ensayo asentamiento de cono del hormigón, para la determinación de la docilidad de las distintas mezclas estudiadas.

En segundo lugar se presenta un análisis de los resultados obtenidos a compresión a la edad de 7 y 28 días. Posteriormente se presenta el análisis para los resultados a flexión por tracción a la edad de 7 y 28 días. Finalmente se presentan los resultados obtenidos de la densidad de los distintos hormigones fabricados.

4.2 Docilidad del hormigón

La medición de docilidad del hormigón se realizó a través del ensayo asentamiento de cono, procedimiento establecido por la Norma NCh 1019 Of 2009. Los valores obtenidos para las distintas mezclas estudiadas se presentan en la siguiente grafica (Figura 4.1).

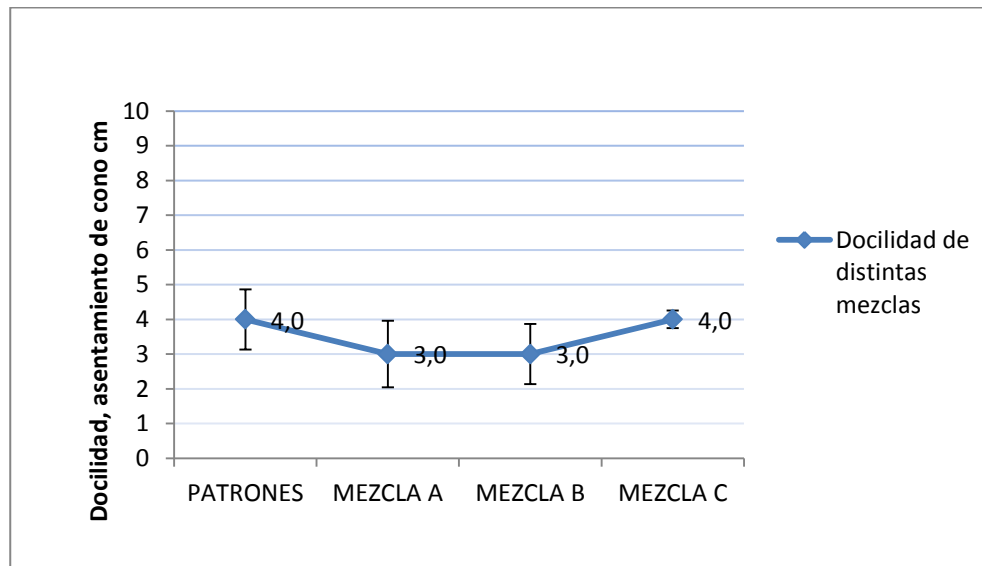


Figura 4.1 Docilidad del hormigón de las distintas mezclas

Fuente: elaboración propia

Preliminarmente los resultados obtenidos de las distintas mezclas presentan valores que cumplen con la docilidad escogida para el diseño de las muestras, indicando asentamientos de cono entre 3 y 5 cm.

Observando la gráfica 4.1 se observa que las mezclas A y B sufrieron una disminución de 25% con respecto a la mezcla patrón, afectando directamente la trabajabilidad de la mezcla.

Principalmente ambas mezclas contienen un 20% de ARH, lo que se atribuye al alto índice de absorción que presenta el árido, capturando rápidamente parte del agua de la mezcla generando una mezcla de aspecto más seca, dificultando la trabajabilidad del material. Sin embargo en la misma grafica se observa que la mezcla C no presentó variación respecto al patrón, ésta obtuvo un índice de descenso de cono de 4 cm.

Pese a que la mezcla presenta también un 20% de ARH, afectado la trabajabilidad del material por su alto índice de absorción, ésta contiene el 50% EFC reemplazado por la arena de la mezcla. La característica principal de esta partícula, por el contrario al ARH, absorbe menos cantidad de agua un 28% menos que un árido natural y más de un 50% comparándola con ARH.

De acuerdo a lo visto en el ensayo las mezclas diseñadas con residuos industriales, no presentaron dificultades en el mezclado, transporte y maleabilidad del material, asimilando esta propiedad a la de un hormigón con áridos naturales. Las docilidades obtenidas en esta investigación y según lo establecido en la NCh 170 of 85 considera hormigones con cono inferior a 5 cm para utilización en pavimentos, lo que estas mezclas con áridos de residuos industriales no presentaría dificultades con respecto a esta propiedad.

4.3 Ensayo a compresión

4.3.1 Ensayo a compresión a 7 y 28 días

La obtención de los resultados se realizaron tras el procedimiento establecido por la NCh 1037.n 2009. La figura 4.2 presenta los valores de 3 muestras gemelas por tipo de mezcla, ensayados a la edad de 7 y 28 días obteniendo las respectivas resistencias (MPa), para luego definir una resistencia media R_m (MPa).

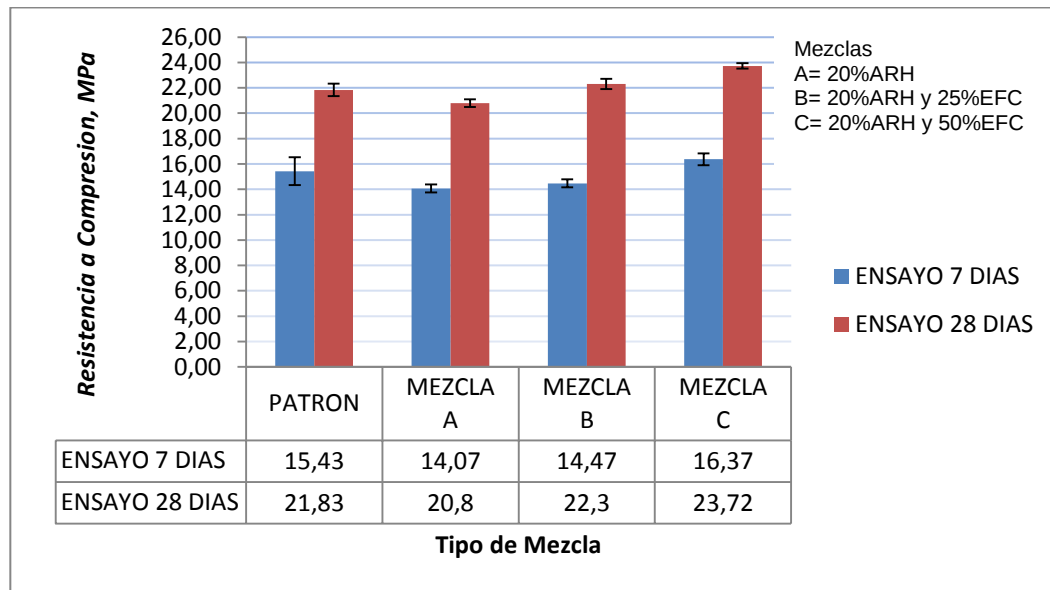


Figura 4.2 Resultados Ensayo a compresión

Fuente: elaboración propia

Lo primero observado en la gráfica 4.2 es el comportamiento que tienen las distintas mezclas a medida que se incorporan las sustituciones de ARH y EFC. A los 7 días presenta una línea de tendencia muy similar que a los 28 días.

La mezcla A con contenido de ARH presenta la más baja resistencia a la compresión a los 7 y 28 días con valores de 14,43 y 20,8 MPa respectivamente. Se puede inferir que la falla se debió producir por el tipo de árido empleado, ya que la pasta de cemento empleada en todas las mezclas resultó ser exactamente la misma. Por el contrario, las mezclas con contenido de EFC presentan mayores resultados que la mezcla A, siendo la mezcla C la que indica la más alta resistencia a compresión a la edad de 7 y 28 días alcanzando resistencias de 16,37 y 23,72 MPa respectivamente.

En la gráfica 4.3 se puede observar el comportamiento que tienen las distintas mezclas en comparación al patrón, relacionando las variaciones de sus resistencias a compresión en función al reemplazo de EFC.

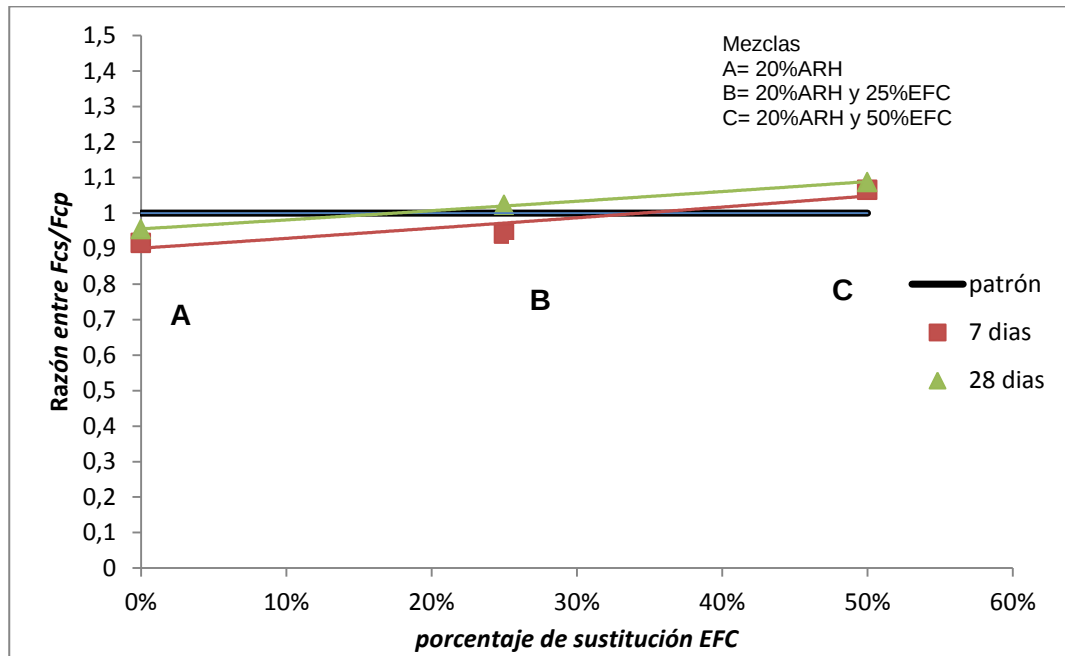


Figura 4.3 Comparación de resistencia a compresión, mezclas

Fuente: elaboración propia

Se infiere que a medida que aumenta el reemplazo de EFC comienza un aumento en la resistencia. Se observa que la mezcla B a los 7 días indica una resistencia menor que la muestra patrón (6%), sin embargo sucede lo opuesto a la edad de 28 días, donde presenta una variación de 2% por sobre la muestra patrón.

Finalmente se puede describir que la mezcla C presentó mejores resistencias a los 7 y 28 días obteniendo variaciones por sobre la mezcla B y el patrón en ambas edades. La mayor variación de esta mezcla fue un 9% por sobre el patrón ocurrida a la edad de 28 días.

Los resultados obtenidos de los ensayos a compresión se comportaron según lo planteado en la hipótesis de esta investigación, indicando que a medida que aumenta la incorporación de escoria como árido fino mejoraría la resistencia del hormigón con árido reciclado grueso, comportándose similar o mejor que el patrón.

Las líneas tendenciales obtenidas son las que representan de mejor manera el comportamiento que tienen las mezclas una vez que se incorpora la escoria de cobre a la mezcla con áridos reciclados.

4.3.2 Resistencia a compresión en función a la edad del hormigón

En la gráfica 4.4 se indica lo que ocurre con las distintas mezclas en función a la edad del hormigón.

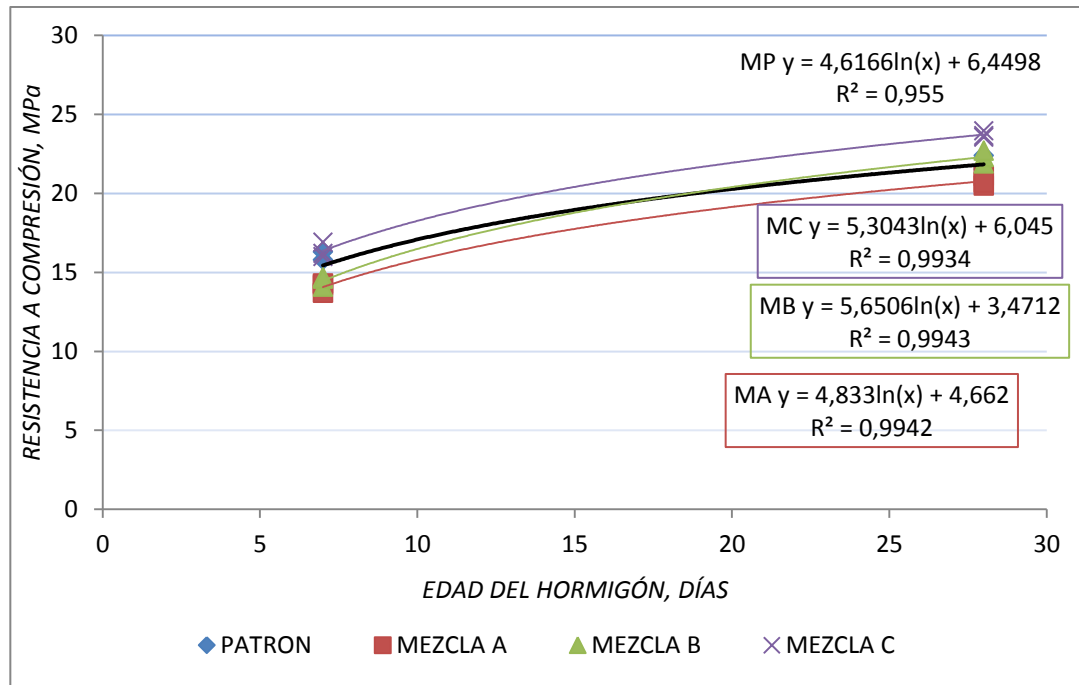


Figura 4.4 Evolución de la resistencia en función de la edad del hormigón

Fuente: elaboración propia

La evolución que presenta el patrón está representada en la gráfica por la línea negra. Se observa que la mezcla B (representada línea verde) presentó una mejora en la resistencia en función a la edad superando a los 28 días la resistencia del patrón. Sin embargo las mezclas A y B presentaron un comportamiento similar en función a la evolución del hormigón.

A través de los resultados y el análisis de las gráficas se concluye preliminarmente que las variaciones en las resistencias de las distintas mezclas se deben principalmente al tipo de árido utilizado, ya que la pasta de cemento empleada fue la misma para todas las muestras. Infiriendo que la menor resistencia a compresión se obtuvo de la mezcla que contenía ARH y la mayor resistencia de la mezcla que contenía mayor cantidad de EFC (mezcla C).

La más baja resistencia se atribuye al ARH empleado en esa mezcla tal como se mencionó en el párrafo anterior. Pero principalmente esto se debe a la calidad y característica que presenta este tipo de residuo. Además se puede inferir que la resistencia mecánica de la partícula de ARH es menor a la que poseen las partículas de un árido natural

Por el contrario a lo mencionado anteriormente, este aumento en la resistencia del hormigón se atribuye al contenido de EFC (mezcla C). Con el 25% de EFC comienza a presentar un aumento, sin embargo la mayor resistencia se genera con un 50% EFC. Principalmente esta mejora en la resistencia es atribuible a la calidad y características del tipo de residuo empleado. Se puede inferir que las partículas de EFC tienen mayores resistencias mecánicas en comparación a las partículas de ARH y árido natural.

Según los resultados, el uso de ambos residuos utilizados en conjunto en la fabricación de hormigón, no solo obtiene resistencias similares a un patrón, sino que aumentan en un 8% su resistencia a compresión, por lo que la fabricación de hormigones con el uso de EFC y ARH no presentaría problemas para cumplir con esta propiedad.

4.4 Ensayo a tracción por flexión

4.4.1 Ensayo a flexo- tracción a 7 y 28 días

Los resultados se realizaron a través del procedimiento establecido por la NCh 1038.n 2009. La figura 4.5 presenta los valores de resistencia a flexión por tracción (Rft) y resistencia media (Rm ft) de las distintas muestras ensayadas a la edad de 7 y 28 días.

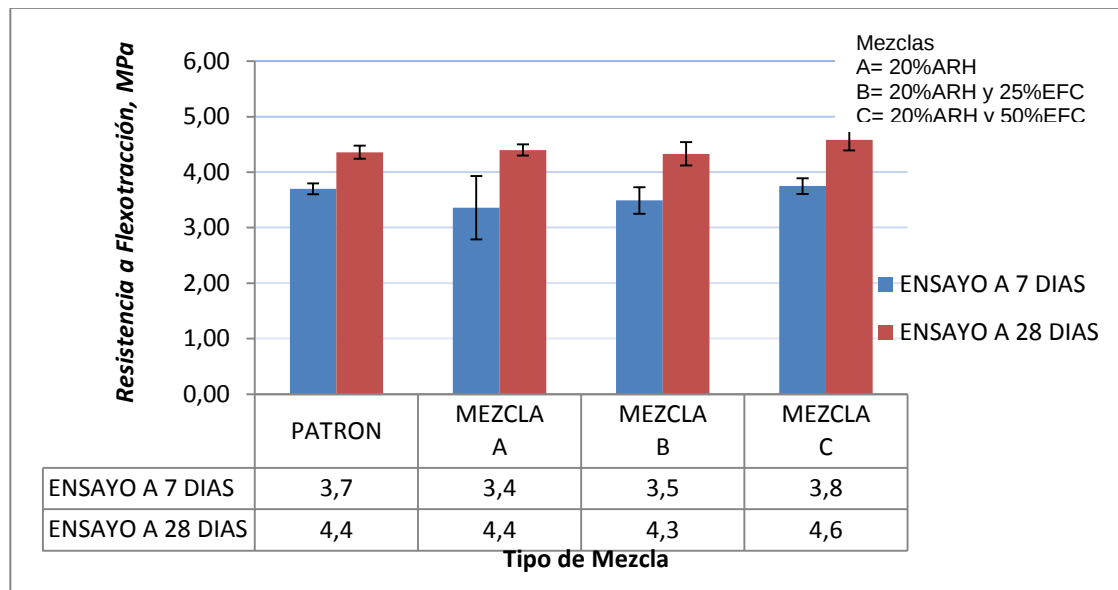


Ilustración 4.5 Resultados Ensayo a Flexo-tracción

Fuente: elaboración propia

Lo primero observado en la figura 4.5 es el comportamiento que presentaron las distintas mezclas respecto a la resistencia a flexión del hormigón. La menor resistencia obtenida fue la mezcla A con 3,4 MPa, pero este valor lo presentó sólo a la edad de 7 días. Por el contrario La mezcla C obtuvo el mayor valor de resistencia a flexión 3,8 y 4,6 MPa a la edad de 7 y 28 días respectivamente.

La figura 4.6 presenta la variación de las mezclas a medida que se incorpora EFC a una mezcla con ARH a la edad de 7 y 28 días. La gráfica relaciona los resultados de fts (resistencia a flexotracción de mezclas con sustitución) en razón de ftp (resistencia a flexotracción del patrón). De esta manera se pueden observar las variaciones que existen entre una mezcla y otra.

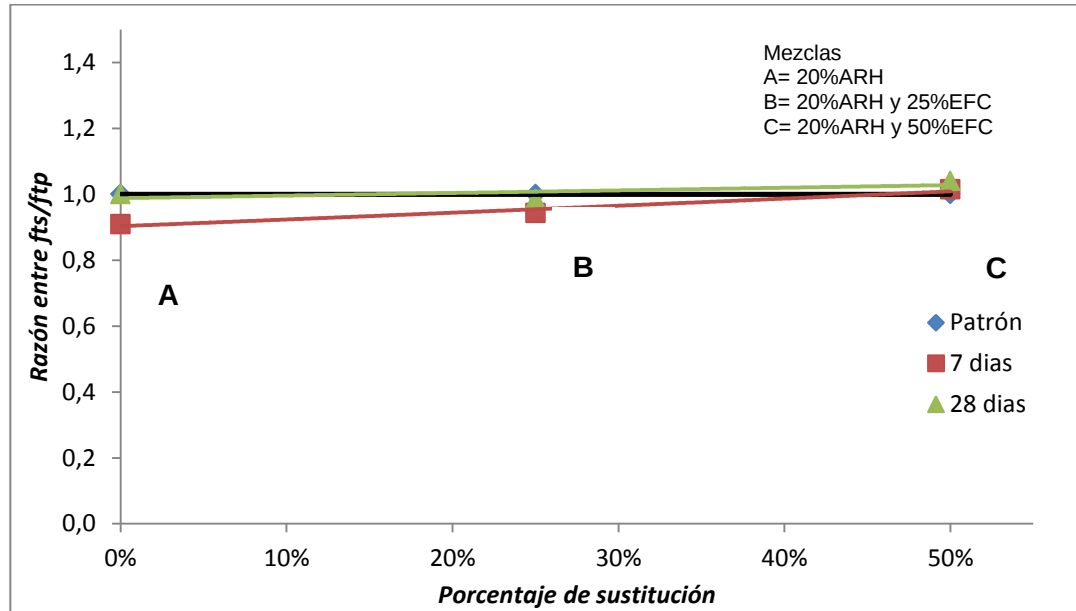


Figura 4.6 Comparación de resistencia a flexotracción, mezclas

Fuente: elaboración propia

El comportamiento que tienen las distintas mezclas a la edad de 7 días varía del comportamiento que presentan estas mismas a la edad de 28 días. Por ejemplo en la gráfica de la figura 4.6 se observa la línea de tendencia de las mezclas a temprana edad, la mezcla A disminuye la resistencia en un 8% del patrón. Una vez que se incorpora la EFC la línea de tendencia comienza a disminuir su diferencia con respecto al patrón logrando superar un 3%.

Distinto es lo que ocurre con las resistencias a los 28 días, según la gráfica se observa que es poca la variación que presentan las mezclas A, B y C con respecto al patrón. Sí es posible observar la pequeña variación de un 4% de la mezcla C superando la resistencia obtenida por el patrón.

Se puede inferir tal como sucedió con la resistencia a compresión que el mayor valor de la mezcla C se debe principalmente a las características del tipo de árido empleado, aumentando levemente las resistencias a flexión.

4.4.3 Resistencia a flexo- tracción en función a la edad del hormigón

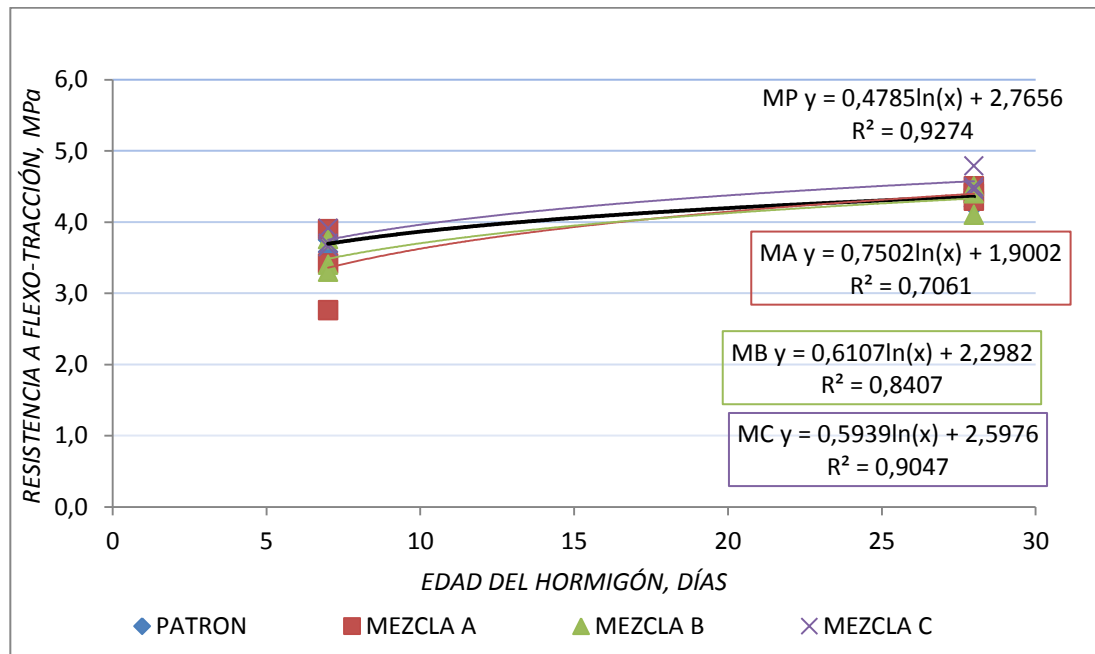


Figura 4.7 Evolución de la resistencia en función a la edad del hormigón

Fuente: elaboración propia

La evolución que presentan las distintas mezclas a la flexión en comparación a la compresión es una estrecha variación. Pero se observa en la figura 4.7 que las mezclas presentan un aumento progresivo a medida que transcurren los días asimilándose al hormigón patrón.

Además, se observa que la curva de resistencia a flexotracción muestra un crecimiento más paulatino entre los 7 y 28 días si se compara con la curva de la resistencia a compresión. La mezcla patrón muestra un crecimiento en la resistencia a flexotracción de un 15%. Mientras que las mezclas A, B y C presentan crecimiento de un 24%, 20% y 18% entre los 7 y 28 días.

La menor resistencia a flexión obtenida se debe a dos factores, fundamentalmente a que el hormigón en masa presenta malos resultados en el comportamiento frente a la flexión y segundo a que la mezcla que presentó estos resultados corresponde a la mezcla con contenido de ARH y al igual que los resultados de resistencia a compresión se atribuye principalmente a la característica del árido.

Por el contrario, la mayor resistencia obtenida con la mezcla C, tal cual como ocurrió en la compresión, se atribuye al contenido de EFC que presenta. La característica de este tipo de árido le proporciona un aumento en su resistencia superando lo obtenido por la mezcla A y la mezcla patrón.

El uso de residuos otorga un aumento en la resistencia a flexión principalmente con el contenido de EFC que proporciona un aumento de resistencia a la mezcla A y permite incluso superar levemente la resistencia de un hormigón patrón.

4.5 Densidad del hormigón

En la figura 4.8 se presentan los valores obtenidos del cálculo de densidades aparentes (pap) de las distintas muestras y la figura 4.9 presenta una variación porcentual de las distintas mezclas, según el procedimiento establecido por la NCh 1037 y 1038.n 2009.

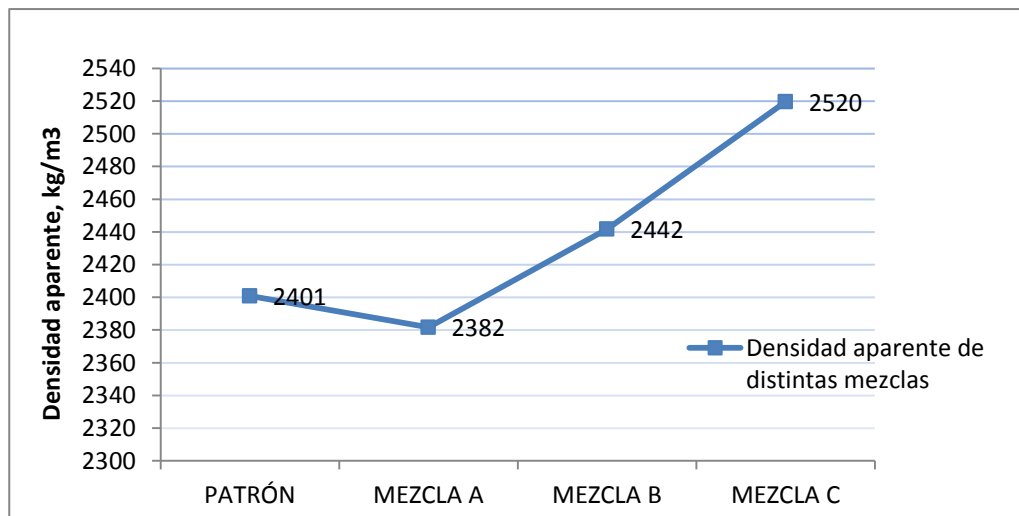


Figura 4.8 Densidad aparente mezclas de hormigón

Fuente: elaboración propia

La gráfica en la figura 4.9 se presentan las variaciones de las distintas mezclas de hormigón fabricadas, estas diferencias comparan las mezclas con contenido de residuos y la mezcla patrón.

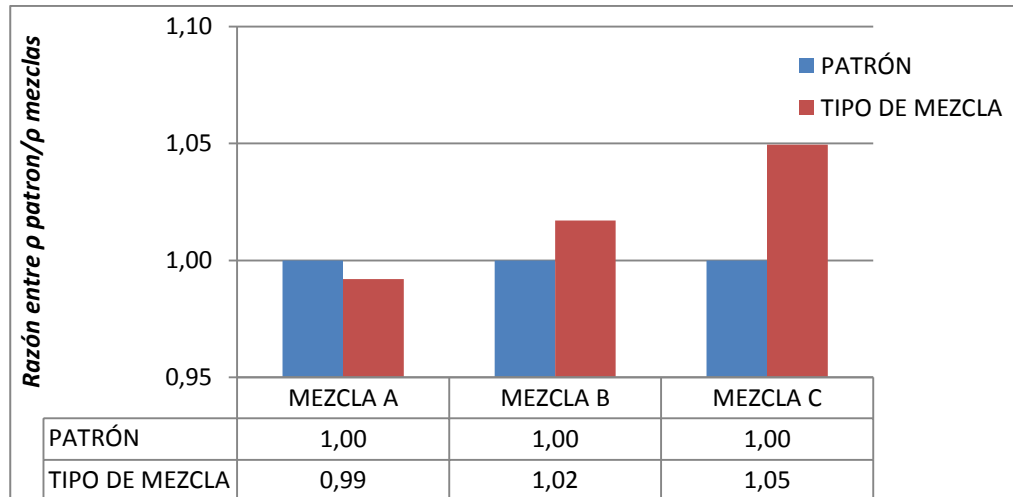


Figura 4.9 Diferencia de Densidad de las distintas mezclas de hormigón

Fuente: elaboración propia

En la figura 4.9 se observa variaciones porcentuales de todas las mezclas respecto al hormigón patrón. La densidad aparente obtenida de la muestra patrón fue 2401 kg/m^3 indicando una densidad que corresponde a un hormigón normal. También, los resultados de las mezclas con ARH y EFC corresponden a la misma clasificación.

La grafica muestra que la mezcla A, que contiene un 20% de ARH, disminuye la densidad en un 1% respecto al patrón. Esta disminución es bastante leve, sin embargo reafirma que los hormigones fabricados con este tipo de árido disminuyen la densidad de éste.

Este efecto se atribuye principalmente a la partícula de ARH, específicamente a la densidad de la misma, la cual tiene una densidad superficial seca 9% menor que la partícula de árido normal. Además el leve descenso 1% de la densidad del hormigón se debe al poco % de sustitución del material y al recomendado por la normativa y estudios que mantienen invariable esta propiedad.

Lo que se observa en la gráfica respecto a las mezclas B y C es un aumento de la densidad y es directamente proporcional al aumento en el reemplazo de EFC, en un 2 y 5% respectivamente. Este efecto se debe puntualmente a la partícula de EFC la cual presenta un peso específico 31% mayor a lo que posee un árido natural. Específicamente el componente principal de esta partícula el fierro es quien le otorga un alto peso específico a este tipo de material.

Como conclusión preliminar se menciona que el uso de ambos residuos EFC y ARH como mezcla C, para la fabricación de nuevos hormigones, no presentaría mayores dificultades frente esta propiedad del hormigón.

Capítulo V

Conclusiones y proposiciones de futuras investigaciones

5. Conclusiones y proposiciones de futuras investigaciones

5.1 Generalidades

En este capítulo se resume los aspectos más relevantes derivados de los resultados de la investigación, y se concluye con respecto al cumplimiento de los objetivos propuestos. Además se determina si la hipótesis empleada para el desarrollo de la investigación cumple con lo aseverado o refuta.

5.2 Conclusiones

En relación a los resultados de la caracterización de los residuos industriales se destaca lo siguiente:

Respecto a la granulometría o distribución de tamaños, las EFC y arena convencional utilizados para la fabricación de muestras no cumplieron con la banda establecida en la norma. Sin embargo utilizados dentro de las mezclas A, B y C no presentaron problema para cumplir con la banda granulométrica de árido combinado establecida en la NCh 163n. 2013. Para el caso de los áridos gruesos los ARH y Gravilla natural no presentaron dificultades para cumplir con las bandas de árido grueso.

En relación a propiedades físicas que presentan los áridos se observó lo siguiente:

Respecto a la densidad de las partículas de EFC y ARH su uso en las mezclas de hormigón, afectan directamente en las propiedades. Específicamente las EFC aumentan la densidad aparente del hormigón y los ARH la disminuyen. Sin embargo esto también se relaciona con la cantidad de sustitución del árido.

La absorción de las EFC y ARH es otra característica de las partículas que afectan directamente las propiedades del hormigón. Significativamente son los ARH los que afectan principalmente la docilidad de los hormigones por su alta capacidad de absorción.

La resistencia al desgaste de las EFC y ARH también es una característica de las partículas que está vinculada directamente con las propiedades del hormigón. Principalmente se atribuye a la resistencia mecánica observada en las mezclas de esta investigación. Los ARH presentan el menor índice de resistencia al desgaste, y por el contrario son las EFC quienes presentan el mayor índice incluso mayor resistencia que una partícula de árido natural.

El contenido de finos que presentan las EFC estudiadas presentan valores mayores que un árido natural, sin embargo los valores que establece la NCh 163n 2013 indican que las EFC no presentarían dificultades para cumplir. En cambio lo ARH contiene un valor mayor a un árido natural y al valor que establece la norma, principalmente esta característica de este material se atribuye al mortero adherido lo que genera continuamente contenido de fino provocado por la manipulación del material y la poca resistencia al desgaste mencionado en el párrafo anterior.

En relación a la docilidad de los hormigones obtenidos se destaca lo siguiente:

La docilidad del hormigón se vio disminuida en la mezcla con contenido de ARH. Esto se atribuye fundamentalmente a la característica del árido y su alta capacidad de absorción. Pese a que las mezclas con contenido de residuos sufrieron variaciones respecto al patrón, estas cumplieron con el rango de asentamiento de cono determinado por diseño del hormigón. Sin embargo se observó que la mezcla C con un contenido de 20% ARH y 50% EFC logró equilibrar la docilidad manteniéndose invariable respecto al patrón. El empleo de EFC y ARH en las mezclas utilizadas en esta investigación no presentarían dificultades respecto al tipo de hormigón que se requiere considerando el factor de diseño.

En relación a las resistencias mecánicas del hormigón se destaca lo siguiente:

La resistencia a compresión resulta ser una propiedad característica del hormigón, siendo una de las más importantes que represente a este material. El uso de EFC y ARH en las cantidades que representa la mezcla C obtiene los resultados más factibles, presentando valores incluso mayores (8%) que la muestra patrón. Sin embargo los resultados de mejora en esta propiedad se atribuyen principalmente a las partículas de EFC las cuales presentan mayor resistencia al desgaste y posiblemente presenten una mayor resistencia mecánica que un árido natural. Finalmente estos resultados determinan que el empleo de residuos EFC y ARH permite asimilar las propiedades resistentes a compresión del hormigón.

De acuerdo a los resultados, en la resistencia a flexión existe una mínima variación entre las mezclas que se observa a edades tempranas como también a 28 días. Sin embargo, al igual que la resistencia a compresión la mezcla C presenta valores mayores al hormigón patrón. Además el contenido de EFC ayuda al aumento de la capacidad resistente de la mezcla A. La característica respecto a la evolución del hormigón se destaca el aumento progresivo de las resistencias en función a los días de las mezclas A, B y C tal como lo presenta la muestra patrón.

En relación a la densidad aparente del hormigón se destaca:

Los resultados presentaron variaciones de los hormigones con residuos respecto a la muestra patrón. La menor densidad se observó en la mezcla A esta disminución se atribuye al uso de ARH y al menor peso específico de la partícula. La mayor densidad se observó en la mezcla C la cual contiene un mayor uso de EFC (50%). Sin embargo la mayor valor fue de un 5% obtenida por la mezcla C, esto no presenta una mayor variación respecto a la densidad de un hormigón convencional.

5.3 Resumen de las conclusiones, futuras investigaciones y conclusiones generales.

Respecto a la caracterización de los áridos, los residuos empleados en la fabricación de hormigones en este estudio, presentaron propiedades distintas a un árido natural.

Por ejemplo los ARH como árido grueso en comparación a un árido grueso natural presentaron:

- Menor densidad
- Menor resistencia al desgaste
- mayor contenido de fino
- mayor capacidad de absorción

Y las EFC como árido fino en comparación a una arena natural presentaron:

- Mayor densidad
- Mayor contenido de fino
- Menor capacidad de absorción

Sin embargo estas variaciones no condicionan su uso para la fabricación de hormigones trabajando con porcentajes dentro de los rangos usados en esta investigación.

Respecto a las propiedades del hormigón y el efecto con los reemplazos parciales de EFC y ARH.

El efecto del uso de residuos industriales en las distintas mezclas no produjo una mayor variación sobre las propiedades físicas y mecánicas del hormigón. Si fue posible destacar el comportamiento que obtuvo la mezcla C con un 20% de ARH y un 50% de EFC. Esta mezcla obtuvo los mayores resultados en comparación al hormigón convencional diseñado:

- Mantuvo la trabajabilidad de la mezcla
- Aumento un 8% y 4% las resistencias mecánicas, a compresión y flexión respectivamente.
- Aumento un 5% la densidad del hormigón

Según las características del hormigón obtenido indica que el uso de residuos industriales no presenta mayores variaciones en la docilidad, compresión, flexión y densidad del hormigón, utilizando los rangos de sustitución de EFC y ARH estudiados.

Si sería importante conocer cómo se comportarían las mezclas estudiadas a edades mayores de hormigón, específicamente observar el comportamiento frente a variaciones de volumen, durabilidad y ambientes adversos.

Finalmente, como consideraciones se puede decir que el uso de residuos industriales en el uso como árido para hormigones, bajo las condiciones trabajadas en esta investigación, presenta ciertas ventajas. Principalmente la valorización que se le puede dar a un material que está considerado como residuo, además que no solo a nivel nacional, sino internacional son materiales que generan grandes índices de contaminación ambiental. Sin embargo para garantizar su utilización es necesario que existan normativas respectivas que consideren a las EFC y ARH como áridos para hormigones indicando recomendaciones y condiciones de trabajo con los residuos.

Además es necesario el estudio del ciclo de vida que presenta estos materiales, considerando el impacto ambiental y un análisis de costo que tendría trabajarlos.

Para el análisis de las conclusiones respecto al cumplimiento de los objetivos e hipótesis de la investigación vale recordar cuales fueron.

El objetivo principal de la investigación fue *“Analizar la influencia del uso de residuos industriales como áridos para el hormigón sobre las propiedades físicas y mecánicas, reemplazando el árido fino por escoria de cobre y el árido grueso por reciclado de hormigón demolido, como alternativa para la valorización de residuos industriales”*.

Además se trabajó bajo la hipótesis de

“Es posible usar residuos industriales como áridos, EFC como arenas y ARH como gravilla, para la fabricación de hormigón permitiendo la obtención de propiedades similares a un hormigón patrón”.

Además para el cumplimiento del objetivo principal se determinaron objetivos específicos los cuales fueron caracterizar las EFC y ARH, y determinar el efecto de su remplazo en las propiedades del hormigón. Cada objetivo en particular se cumplió obteniendo resultados para su análisis y dar paso a elaborar las conclusiones de la investigación.

Con los resultados obtenidos en la presente investigación se pudo validar la hipótesis de trabajo, principalmente es posible el uso de EFC como arenas y ARH como grueso, sin afectar considerablemente las propiedades del hormigón. A su vez con la validación de la hipótesis se cumple con el objetivo principal de la investigación.

6. Bibliografía

- Ajdukiewicz A. y Kliszczewicz A. (2002), "Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC", Cement and Concrete Composites, vol. 24, n° 2, pp. 269-279.
- Aguilar C., Muñoz M. y Loyola O. (2005). "Utilización de hormigón reciclado como material de reemplazo de árido grueso para la fabricación de hormigón". Publicación revista de ingeniería en construcción Pontificia Universidad Católica de Chile Vol.20 N°1 Abril del 2005. www.ing.puc.cl/ric
- Al-Jabri K., Taha R. y Al-Ghassani M., (2002). "Use of copper slag and cement by- pass dust as cementitious materials". Cement Concrete Aggr Vol. 24 N° 1, pp. 7-12.
- Arcos C. (1983). Constructor Civil. Académico investigador. Instituto de Investigaciones y ensayos de materiales, Universidad de Chile. Seminario "Tecnología del Hormigón". Escuela de Construcción Civil, Facultad de Arquitectura, Universidad de Valparaíso.
- British Standard (2000). "Part 1: Specification, performance, production and conformity". BS EN 206-1:2000.
- Burgos D. (2010). "Guía para la gestión y tratamiento de residuos y desperdicios de proyectos de construcción y demolición". Tesis para optar al Título de Ingeniero en Construcción. Universidad Austral de Chile.
- Cámara Chilena de la Construcción, (2012). "Estudio preliminar residuos de la construcción en Antofagasta RESCON". Unidad de estudios CChC Antofagasta.
- Cedoya P. (2009). Ingeniero. "Efecto de la resistencia de las escorias de fundición de cobre como agregado fino en el comportamiento resistente del hormigón". Publicación revista Chilena de ingeniería, Vol 17 N°1.
- Chauveinc J. (2011). "Estudio experimental de propiedades mecánicas de hormigones con áridos reciclados mediante la modificación del método de elaboración del hormigón". Tesis para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Castillo W. (2015). "Evaluación de la resistencia a compresión y flexotracción del hormigón con áridos de loza sanitaria". Tesis para optar al grado de licenciado en ciencias de la construcción y al título de Ingeniero Constructor, Universidad de Valparaíso.

- Codelco (2015). “Reporte de Sustentabilidad”. Memoria anual 2015, pág. web: <http://www.codelco.com/memoria2015/>.
- Codelco (2016). Página web: <http://www.codelco.com>.
- Comisión Nacional del Medio Ambiente, (2010). “Primer reporte del manejo de residuos sólidos en Chile”. Gobierno de Chile, CONAMA; Unidad Desarrollo Tecnológico; Universidad de Concepción.
- Deutschen Instituts für Normung e.V. (2002). “Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel – Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen gültig”. DIN 4226 – 100 2002-02. Web: <https://www.beuth.de/de/norm/din-4226-100>.
- European Statistics, Eurostat, (2010). Página web: <http://ec.europa.eu/eurostat>.
- Gálvez G., (2014). “Prospección y Caracterización de las Escorias de Cobre del Depósito Fundición Ventanas. Estudio de Factibilidad para su empleo en Hormigones”. Tesis para optar al grado de licenciado en ciencias de la construcción y al título de Ingeniero Constructor, Universidad de Valparaíso.
- García C. (2009). Ingeniero Civil. “Durabilidad del hormigón con áridos reciclados”. Tesis doctoral, Universidad de Cantabria. Publicación revista Science Direct, Construcción y Materiales de Construcción, vol 40. 2013.
- González B., (2002). “Hormigones con áridos reciclados procedentes de demoliciones: dosificaciones, propiedades mecánicas y comportamiento estructural a cortante”. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de la Coruña.
- Codelco, (2016). Página web: http://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos.
- Instituto Nacional de Normalización INN. Chile (2013). “Áridos para morteros y hormigones- Requisitos”, NCh163.n2013 (norma vigente).
- Instituto Nacional de Normalización INN. Chile (2009). “Áridos para morteros y hormigones – Extracción y preparación de muestras”, NCh 164.n2009 (norma vigente).
- Instituto Nacional de Normalización INN. Chile (2009). “Áridos para morteros y hormigones- Tamizado y determinación de la granulometría”, NCh 165. Of 2009.

- Instituto Nacional de Normalización INN. Chile (2008). “Áridos para morteros y hormigones - Determinación de la densidad aparente”, NCh 1116.n2008 (norma vigente).
- Instituto Nacional de Normalización INN. Chile (2010). “Áridos para morteros y hormigones – Determinación de las densidades real y neta y de la absorción de agua de las gravas”, NCh 1117.Of 2010.
- Instituto Nacional de Normalización INN. Chile (2009). “Áridos para morteros y hormigones – Determinación de las densidades real y neta y de la absorción de agua de las arenas”, NCh 1239.n2009 (norma vigente).
- Instituto Nacional de Normalización INN. Chile (2010). “Aridos – Determinación del desgaste de las gravas – Método de la Máquina de los Angeles”, NCh1369.n2010 (norma vigente).
- Instituto Nacional de Normalización INN Chile (1985). “Hormigón - Requisitos generales”, NCh 170. Of1985.
- Instituto Nacional de Normalización INN Chile (1977). “Hormigón- Preparación de mezclas de prueba en laboratorio”, NCh 1018. Of 1977.
- Instituto Nacional de Normalización INN Chile (2009). “Hormigón – Determinación de la docilidad – Método del asentamiento del cono de Abrams”, NCh 1019. Of 2009.
- Instituto Nacional de Normalización INN Chile (2009). “Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas”, NCh 1037.n2009 (norma vigente).
- Instituto Nacional de Normalización INN Chile (2009). “Hormigón – Ensayo de tracción por flexión”, NCh 1038.n2009 (norma vigente).
- Instrucción Española del Hormigón EHE (2008). Normativa Española de cálculo y seguridad en estructuras de hormigón. Anejo 15 EHE – 08.
- Martínez I. y Mendoza C. (2006). Comportamiento mecánico de concreto fabricado con agregados reciclados”. Revista Ingeniería investigación y tecnología, Vol VII N°3. Instituto de ingeniería UNAM.
- Ministerio del Medio Ambiente, (2009). “Levantamiento, Análisis, Generación y Publicación de Información Nacional Sobre Residuos Sólidos de Chile”. MMA, Gobierno de Chile.
- Ministerio del Medio Ambiente, Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes, 2014- 2016. Pág: <http://www.mma.gob.cl/retc>

- Molina J., 2015. "Evaluación de la durabilidad del hormigón con áridos reciclados expuestos a ciclos de hielo- deshielo". Tesis para optar al título de Ingeniero Constructor. Facultad de Ingeniería, Universidad de Valparaíso.
- Morales C., 2013. "Influencia de la incorporación de Escoria de Cobre Sobre la Durabilidad de Hormigones". Tesis para optar al título de Ingeniero Constructor. Facultad de Ingeniería, Universidad de Valparaíso.
- Moura W. y Coutinho D., 2004. "Influence of copper slag admixture in concrete in durability properties". Ambiente Construido. Porto Alegre. Vol 4 N° 2, pp. 41-56.
- Navarro A., 2014. "Uso y fomento del árido reciclado en hormigón estructural como oportunidad de mejora medioambiental y económica. Aplicación a la Comunidad Autónoma de la Rioja". Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Universidad de la Rioja.
- Olivari R. 2007. "Efectos sobre la docilidad y sobre las resistencias mecánicas de hormigones con agregados reciclados gruesos y finos". Tesis para optar al título de ingeniero constructor. Facultad de Ingeniería, Universidad de Valparaíso.
- Orizola S. (2006). "Uso de escoria de cobre en cementos". Departamento Ingeniería Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
- Poblete J., Gajardo A., Olivarez R., Nazarala M., Carrasco R., Arias C., Campos J., Greig J., Jara J., Padilla M., Zuñiga E., 2011. Anuario de la Minería de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería SERNAGEOMIN. Ministerio de Minería, Gobierno de Chile
- Sánchez M., Parada F., Parra R., Márquez F., Jara R., Carrasco J.C. y Palacios J. (2004). "Management of copper pyrometallurgical slags: giving additional value to the copper mining industry". VII International Conference on Molten Slags, Fluxes & Salts, The South African Institute of Mining and Metallurgy.
- Sánchez M. (2005). "Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. Universidad Tecnológica de Madrid, España. Tesis Latinoamericanas.
- Sánchez M; Reyes P; Valenzuela A. (2010). "Opciones para el manejo y comercialización de escorias de cobre". Reciclaje y Recuperación de

Metales y Materiales, 1^{er} Workshop Internacional Abril 2010- Santiago-Chile; Universidad de Concepción.

- Santos M.; Brito J.; Santos A. (2009). "Métodos de evaluación de reacciones álcali-sílice en hormigones con áridos reciclados". Revista Ingeniería de Construcción, Vol. 24 N°2, www.ing.puc.cl/ric.
- Sepúlveda C. (2006). "Utilización de escorias de fundición para la producción de compuestos de hierro". Departamento de ingeniería química y biotecnología. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
- Soto F. (2013). "Estudio de retracción hidráulica en hormigón con agregado grueso reciclado". Tesis para optar al título de ingeniero constructor. Facultad de Ingeniería, Universidad de Valparaíso.
- Valle J. (2002). "Reciclado de hormigón como agregado grueso para hormigones". Tesis para optar al título de ingeniero constructor. Facultad de Ingeniería, Universidad de Valparaíso.
- Zapata M., (2006). "Caracterización de cementos y hormigones fabricados a partir de escorias de fundición de cobre". Tesis para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción.

7. Anexos

En el presente anexo, se recopilan todos los datos obtenidos para los distintos ensayos realizados. Se presentan resultados de Tablas y gráficas.

7.1 Ensayos granulométricos

Las siguientes tablas presentan el ensayo de granulometría realizado a los 4 áridos empleados en esta investigación.

Tabla 7.1 Granulometría del árido grueso, gravilla convencional

		% acumulado	que pasa		% que pasa	(Nch 163)
ASTM	NCh (mm)	muestra 1	muestra 2	Promedio	banda inferior	banda superior
3"	75	-	-	-	-	-
2 1/2"	63	-	-	-	-	-
2"	50	-	-	-	-	-
1 1/2"	37,5	-	-	-	-	-
1"	25	100	100	100	100	100
3/4	20	99,53	99,53	99,53	90	100
1/2	12,5	53,05	53,07	53,06	-	-
3/8	9,5	20,86	20,9	20,88	20	55
#4	4,75	2,62	2,68	2,65	0	10
#8	2,36	0,01	0,1	0,055	0	5

Fuente: elaboración propia

Tabla 7.2 Granulometría reciclado de hormigón

		% acumulado	que pasa		% que pasa	(Nch 163)
ASTM	NCh (mm)	muestra 1	muestra 2	promedio	banda inferior	banda superior
3"	75	-	-	-	-	-
2 1/2"	63	-	-	-	-	-
2"	50	-	-	-	-	-
1 1/2"	37,5	-	-	-	-	-
1"	25	100	100	100	100	100
3/4	20	100	100	100	90	100
1/2	12,5	43,55	44,23	43,89	-	-
3/8	9,5	20,03	21,4	20,715	20	55
#4	4,75	1,81	3,6	2,705	0	10
#8	2,36	0	0	0	0	5

Fuente: elaboración propia

Tabla 7.3 Granulometría del árido fino, arena convencional

		% acumulado	que pasa		% que pasa	Nch 163
Nch	ASTM	muestra 1	muestra 2	Promedio	banda inferior	banda superior
12,5	1/2"	-	-	-	-	-
9,525	3/8	100	100	100	100	100
4,75	#4	82,28	81,9	82,09	95	100
2,36	#8	64,01	64,05	64,03	80	100
1,18	#16	52,44	52,5	52,47	50	85
0,8	#30	45,75	45,68	45,715	25	60
0,3	#50	36,17	36,2	36,185	5	30
0,16	#100	9,58	10,1	9,84	0	10
0,075	#200	0,9	1	0,95	0	0

Fuente: elaboración propia

Tabla 7.4 Granulometría Escoria de Cobre (EFC)

		% acumulado	que pasa		% que pasa	Nch 163
Nch	ASTM	muestra 1	muestra 2	promedio	banda inferior	banda superior
12,5	1/2"	-	-	-	-	-
9,525	3/8	100	100	100	100	100
4,75	#4	99,61	99,2	99,405	95	100
2,36	#8	65,01	65,3	65,155	80	100
1,18	#16	41,04	40,8	40,92	50	85
0,8	#30	28,41	28,64	28,525	25	60
0,3	#50	19,27	20,02	19,645	5	30
0,16	#100	11,79	11,44	11,615	0	10
0,075	#200	0,64	0,2	0,42	0	0

Fuente: elaboración propia

Las tablas y gráficas siguientes presentan las granulometrías corregidas de áridos combinados, se presentan las combinaciones de gravilla- arena convencional, combinaciones de áridos gruesos, combinaciones de áridos finos y finalmente combinaciones de las distintas mezclas confeccionadas (mezcla A, mezcla B y mezcla C).

Tabla 7.5 Granulometría de áridos combinados convencionales

		COMBINACION GRAVILLA CONVENCIONAL- ARENA CONVENCIONAL						
			porcentaje que pasa					
		gravilla	arena	%	% q pasa	(Nch 163)		
ASTM	NCh (mm)	natural	natural	banda comb.	arido combinado	Banda inferior	banda superior	
1"	25	100	100	57 + 43	100	-	-	
3/4	20	99,53	100	57 + 43	100	100	100	
1/2	12,5	53,06	100	30 + 43	73	-	-	
3/8	9,5	20,88	100	12+ 43	55	62	77	NO CUMPLE
#4	4,75	2,65	82,09	2 + 35	37	37	58	
#8	2,36	0,1	64,03	28	28	22	43	
#16	1,18	0	52,47	23	23	13	33	
#30	0,8	0	45,72	20	20	8	23	
#50	0,3	0	36,19	16	16	4	12	NO CUMPLE
#100	0,16	0	9,84	4	4	3	6	

Fuente: elaboración propia

Tabla 7.6 Granulometría áridos combinados gruesos

		COMBINACION GRAVILLA CONVENCIONAL- GRAVILLA RECICLADO HORMIGÓN					
		porcentaje que pasa					
		gravilla	gravilla	%	% q pasa	(Nch 163)	
ASTM	NCh (mm)	natural	ARH	banda comb.	arido combinado	Banda inferior	banda superior
1"	25	100	100	80 + 20	100	100	
3/4	20	100	100	80 + 20	100	90	100
1/2	12,5	53,1	43,9	42 + 9	51	-	
3/8	9,5	20,9	20,7	17 + 4	21	20	55
#4	4,75	2,7	2,7	2 + 1	3	0	10
#8	2,36	0,1	0,0	0	0	0	5
#16	1,18	0	0	0	0	-	
#30	0,8	0	0	0	0	-	
#50	0,3	0	0	0	0	-	
#100	0,16	0	0	0	0	-	

Fuente: elaboración propia

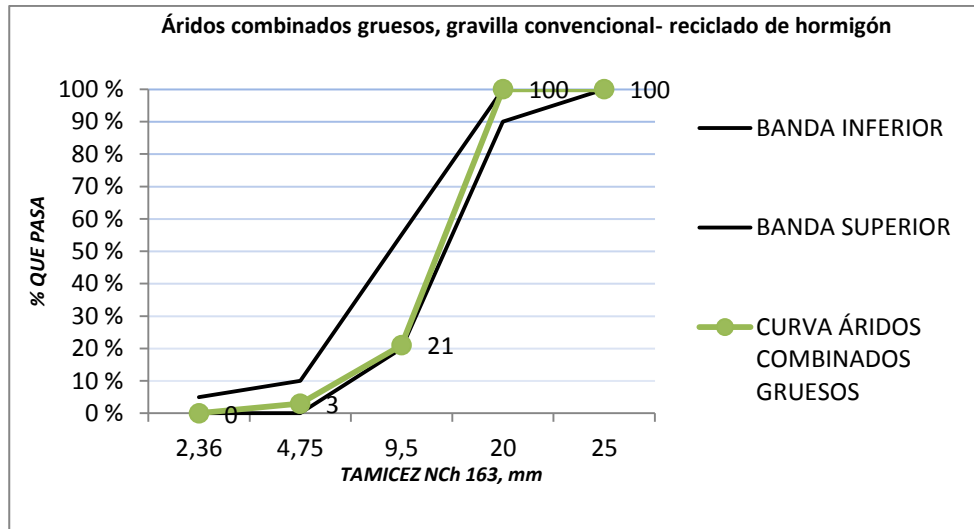


Figura 7.1 Curva áridos combinados gruesos

Fuente: elaboración propia

Tabla 7.7 Granulometría áridos combinados finos

		COMBINACION ARENA CONVENCIONAL- ARENA ESCORIA DE COBRE					
				porcentaje que pasa			
		arena	arena	%	% que pasa	(Nch 163)	
ASTM	NCh (mm)	natural	EFC	banda comb.	arido combinado	Banda inferior	banda superior
1"	25						
3/4	20						
1/2	12,5						
3/8	9,5	100	100	75 + 25	100	100	
#4	4,75	83,24	99,61	62 + 25	87	95	100
#8	2,36	65,17	65,01	49 + 16	65	50	100
#16	1,18	53,9	41,04	41 + 10	51	50	85
#30	0,8	46,56	28,41	35 + 7	42	25	60
#50	0,3	35,21	19,27	26 + 5	31	5	30
#100	0,16	6,64	11,79	5 + 3	8	0	10

Fuente: elaboración propia

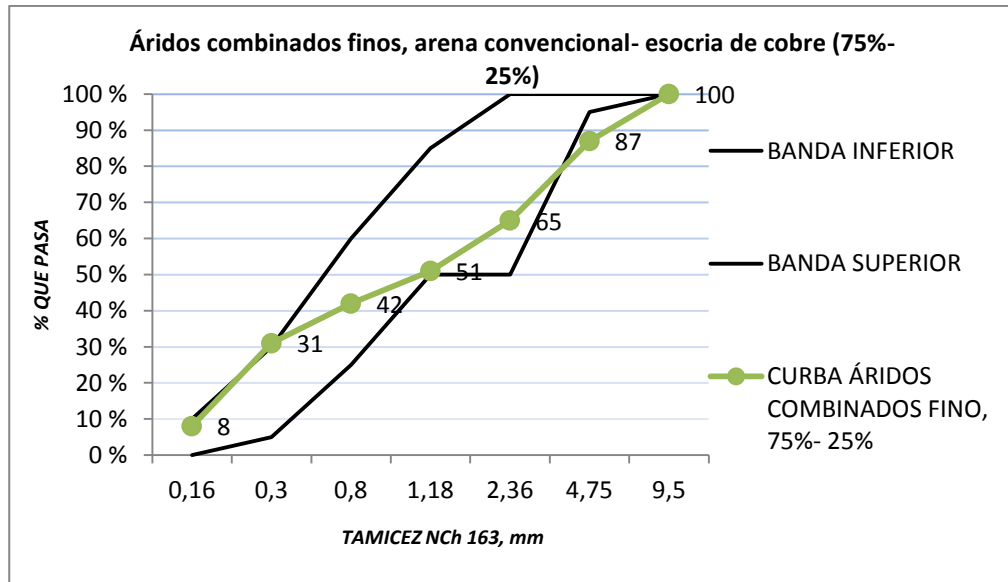


Figura 7.2 Cuerva áridos combinados finos

Fuente: elaboración propia

Tabla 7.8 Granulometría áridos combinados finos

		COMBINACION ARENA CONVENCIONAL- ARENA ESCORIA DE COBRE					
				porcentaje que pasa			
		arena natural	arena EFC	% banda comb.	% que pasa arido combinado	(Nch 163) Banda inferior	
ASTM	NCh (mm)					Banda superior	
1"	25						
3/4	20						
1/2	12,5						
3/8	9,5	100	100	50 + 50	100	100	
#4	4,75	83,24	99,61	42 + 50	92	95	100
#8	2,36	65,17	65,01	33 + 33	66	50	100
#16	1,18	53,9	41,04	27 + 21	48	50	85
#30	0,8	46,56	28,41	24 + 14	38	25	60
#50	0,3	35,21	19,27	18 + 10	28	5	30
#100	0,16	6,64	11,79	4 + 6	10	0	10

Fuente: elaboración propia

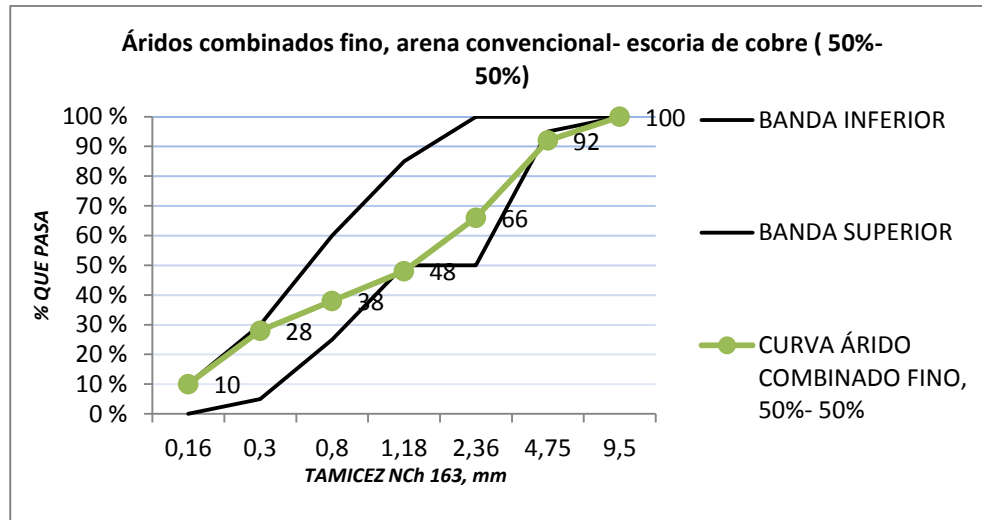


Figura 7.3 Curva áridos combinados finos

Fuente: elaboración propia

Tabla 7.9 Granulometría áridos combinados, mezcla A

		MEZCLA A						
			porcentaje que pasa					
		arido grueso	arena	%	% que pasa	(Nch 163)		
ASTM	NCh (mm)	combinado	natural	banda comb.	MEZCLA A	Banda inferior	banda superior	
1"	25	100	100	57 + 43	100	-	-	
3/4	20	100	100	57 + 43	100	100	100	
1/2	12,5	51	100	29 + 43	72	-	-	
3/8	9,5	21	100	12 + 43	55	62	77	NO CUMPLE
#4	4,75	3	82,09	2 + 35	37	37	58	
#8	2,36	0	64,03	28	28	22	43	
#16	1,18	0	52,47	23	23	13	33	
#30	0,8	0	45,72	20	20	8	23	
#50	0,3	0	36,19	16	16	4	12	NO CUMPLE
#100	0,16	0	9,84	4	4	3	6	

Fuente: elaboración propia

Tabla 7.10 Granulometría áridos combinados, mezcla B

		MEZCLA B						
			porcentaje que pasa					
		arido grueso	arido fino	%	% que pasa	(Nch 163)		
ASTM	NCh (mm)	combinado	combinado	banda comb.	MEZCLA B	Banda inferior	banda superior	
1"	25	100		57 + 43	100	-	-	
3/4	20	100		57 + 43	100	100	100	
1/2	12,5	51	100	29 + 43	72	-	-	
3/8	9,5	21	100	12 + 43	55	62	77	NO CUMPLE
#4	4,75	3	87	2 + 37	39	37	58	
#8	2,36	0	65	28	28	22	43	
#16	1,18	0	51	22	22	13	33	
#30	0,8	0	42	18	18	8	23	
#50	0,3	0	31	13	13	4	12	NO CUMPLE
#100	0,16	0	8	3	3	3	6	

Fuente: elaboración propia

Tabla 7.11 Granulometría áridos combinados, mezcla C

		MEZCLA C					
			porcentaje que pasa				
		arido grueso	arido fino	%	% que pasa	(Nch 163)	
ASTM	NCh (mm)	combinado	combinado	banda comb.	MEZCLA C	Banda inferior	banda superior
1"	25	100		57 + 43	100	-	-
3/4	20	100		57 + 43	100	100	100
1/2	12,5	51	100	29 + 43	72	-	-
3/8	9,5	21	100	12 + 43	55	62	77
#4	4,75	3	92	2 + 40	42	37	58
#8	2,36	0	66	28	28	22	43
#16	1,18	0	48	21	21	13	33
#30	0,8	0	38	16	16	8	23
#50	0,3	0	28	12	12	4	12
#100	0,16	0	10	4	4	3	6

Fuente: elaboración propia

7.2 Ensayo densidades y absorción de áridos

Las siguientes tablas presentan los valores obtenidos en los ensayos para determinar la densidad de los áridos utilizados.

Tabla 7.12 Densidad y absorción de áridos gruesos

TABLA COMPARATIVA DE ARIDOS GRUESOS				
(kg/m3)				
%				
DIFERENCIA				
DENSIDAD REAL DEL ARIDO SATURADO SUPERFICIALMENTE SECO (ρ_{RT})	2637	2409	229	-8,7
DENSIDAD REAL DE ARIDO SECO (ρ_{RS})	2605	2248	357	-13,7
DENSIDAD NETA (ρ_N)	2691	2678	13	-0,5
DENSIDAD APARENTE COMPACTADA (ρ_{ac})	1529	1227	302	-19,8
DENSIDAD APARENTE SUELTA (ρ_{as})	1495	1187	308	-20,6
ABSORCION DE AGUA (α) %	1,22	7,14		5,92

Fuente: elaboración propia

Tabla 7.13 Densidad y absorción de áridos finos

				TABLA COMPARATIVA DE ARIDOS FINOS			
				(kg/m ³)		%	
				Arena	EFC	Δ	DIFERENCIA
DENSIDAD REAL DEL ARIDO SATURADO				2591	3759	1168	31,1
SUPERFICIALMENTE SECO (ρ_{Rss})							
DENSIDAD REAL DE ARIDO SECO (ρ_{RS})				2487	3684	1197	32,5
DENSIDAD NETA (ρ_N)				2775	3984	1209	30,3
DENSIDAD APARENTE COMPACTADA (ρ_{ac})				1909	2575	666	25,9
DENSIDAD APARENTE SUELTA (ρ_{as})				1837	2410	573	23,8
ABSORCION DE AGUA (α) %				1,40	0,40		1,00

Fuente: elaboración propia

7.3 Ensayo contenido de finos de áridos

En la tabla se presenta los resultados obtenidos del ensayo para determinar el contenido de fino menor a 0,08 mm de los áridos.

Tabla 7.14 Contenido de fino de áridos

	MATERIAL FINO MENOR A 0,080 mm (%)			
	PESO MASA	PESO MASA LAVADA	PESO MATERIAL FINO	CONTENIO DE FINO
MUESTRA	SECA	Y SECA	INFERIOR A 0,08mm	INFERIOR A 0,08mm
	g	g	g	%
ARIDOS FINOS				
EFC	1252	1195	57	4,55
ARENA CONV.	737	712	25	3,39
ARIDOS GRUESOS				
ARH°	4078	4017	61	1,50
GRAVA CONV.	4120	4093	27	0,66

Fuente: elaboración propia

7.4 Ensayo de desgaste Los Ángeles de árido gruesos

Las siguientes tablas presentan un complemento para la obtención de resultados del ensayo de desgaste de los áridos, Máquina de los Ángeles.

Tabla 7.15 Granulometría de ARH, para determinación del grado

GRANULOMETRÍA ARH			
MASA MUESTRA (gr)		13610	
tamices		cantidad	% retenido
NCh mm	ASTM	retenida (gr)	
80	3"	-	-
63	2 1/2"	-	-
50	2"	-	-
40	1 1/2"	-	-
25	1"	0	
20	3/4"	190	1,4
12,5	1/2"	6329	46,5
10	3/8"	2798	20,6
6,3	-	-	-
5	#4	3742	27,5
2,5	#8	578	4,2
	Σ	13637	

Fuente: elaboración propia

Tabla 7.16 Determinación del grado de la muestra de ARH

MASA MUESTRA (gr)		13610	Grados de ensayo						
tamices		granulometria							
NCh mm	ASTM	% ppr	1	2	3	4	5	6	7
80-63	2 1/2"	-	-						
63-50	2"	-	-						
50-40	1 1/2"	-	-	-					
40-25	1"	0		0	0	0			
25-20	3/4"	1,4			1,4	1,4			
20-12,5	1/2"	46,5				46,5	46,5		
12,5-10	3/8"	20,6				20,6	20,6		
10-6,3	1/4"	-						-	
6,3-5	#4	27,5						27,5	
5-2,5	#8	4,2							4,2
	Σ	100,2	0,0	0,0	1,4	68,5	67,1	27,5	4,2
	N° de esferas		12				11	8	6
	masa (gr)		5000 ± 25				4584 ± 25	3330 ± 25	2500 ± 25
	N° de revoluciones		1000					500	

Fuente: elaboración propia

Tabla 7.17 Granulometría de EFC, para determinación del grado

GRANULOMETRÍA EFC			
MASA MUESTRA (gr)		10400	
tamices		cantidad	% retenido
NCh	ASTM	retenida (gr)	
80	3"	-	-
63	2 1/2"	-	-
50	2"	-	-
40	1 1/2"	-	-
25	1"	0	
20	3/4"	317	3,0
12,5	1/2"	1391	13,4
10	3/8"	1944	18,7
6,3	-	-	-
5	#4	5937	57,1
2,5	#8	807	7,8
	Σ	10396	

Fuente: elaboración propia

Tabla 7.18 Determinación del grado para muestra de EFC

MASA MUESTRA (gr)		10400				Grados de ensayo			
tamices		granulometria							
NCh mm	ASTM	% ppr	1	2	3	4	5	6	7
80-63	2 1/2"	-	-						
63-50	2"	-	-						
50-40	1 1/2"	-	-	-					
40-25	1"	0		0	0	0			
25-20	3/4"	3,0			3,0	3,0			
20-12,5	1/2"	13,4				13,4	13,4		
12,5-10	3/8"	18,7				18,7	18,7		
10-6,3	1/4"	-						-	
6,3-5	#4	57,1						57,1	
5-2,5	#8	7,8							7,8
	Σ	100,0	0,0	0,0	3,0	35,1	32,1	57,1	7,8
	N° de esferas			12			11	8	6
	masa (gr)			5000 ± 25			4584 ± 25	3330 ± 25	2500 ± 25
	N° de revoluciones			1000				500	

Fuente: elaboración propia

Tabla 7.19 Resumen resultado desgaste de áridos

ARH		EFC	
MUESTRAS PARA ENSAYO DESGASTE		MUESTRAS PARA ENSAYO DESGASTE	
MASA INICIAL (gr)	3780	MASA INICIAL (gr)	3375
MASA FINAL (gr)	2602	MASA FINAL (gr)	2961
PERDIDA DE MASA %	31,2	PERDIDA DE MASA %	12,3

Fuente: elaboración propia

7.5 Dosificaciones por mezcla fabricada

En las tablas siguientes se presentan las dosificaciones de la preparación de hormigón para cada mezcla propuesta, con la corrección de humedad de áridos.

Tabla 7.20 Dosificación con corrección de humedad de áridos, 1

				MEZCLA PATRON			
				Dosificación corregida		VIGAS PATRON	
ARIDOS	ABSORCION	HUMEDAD	DIFERENCIA	Cantidad de hormigon (Its)	1000	Cantidad de hormigon (Its)	45
ARENA	1,4	3,0	1,6	Cemento	kg	Cemento	kg
GRAVILLA	1,22	1,0	-0,22	Agua	Its	Agua	Its
ARH°	7,14		-7,14	Arena	kg	Arena	kg
EFC	1,3		-1,3	Gravilla	kg	Gravilla	kg
				ARH°	kg	ARH°	kg
				EFC	kg	EFC	kg
				MEZCLA PATRON			
				Dosificación corregida		CUBOS PATRON	
ARIDOS	ABSORCION	HUMEDAD	DIFERENCIA	Cantidad de hormigon (Its)	1000	Cantidad de hormigon (Its)	25
ARENA	1,4	3,0	1,6	Cemento	kg	Cemento	kg
GRAVILLA	1,22	1,0	-0,22	Agua	Its	Agua	Its
ARH°	7,14		-7,14	Arena	kg	Arena	kg
EFC	1,3		-1,3	Gravilla	kg	Gravilla	kg
				ARH°	kg	ARH°	kg
				EFC	kg	EFC	kg
				MEZCLA A			
				Dosificación corregida		VIGAS H-AR 20-0%	
ARIDOS	ABSORCION	HUMEDAD	DIFERENCIA	Cantidad de hormigon (Its)	1000	Cantidad de hormigon (Its)	45
ARENA	1,4	3,0	1,6	Cemento	kg	Cemento	kg
GRAVILLA	1,22	1,0	-0,22	Agua	Its	Agua	Its
ARH°	7,14	4,0	-3,14	Arena	kg	Arena	kg
EFC	1,3		-1,3	Gravilla	kg	Gravilla	kg
				ARH°	kg	ARH°	kg
				EFC	kg	EFC	kg
				MEZCLA A			
				Dosificación corregida		CUBOS H-AR 20-0%	
ARIDOS	ABSORCION	HUMEDAD	DIFERENCIA	Cantidad de hormigon (Its)	1000	Cantidad de hormigon (Its)	15
ARENA	1,4	3,0	1,6	Cemento	kg	Cemento	kg
GRAVILLA	1,22	1,0	-0,22	Agua	Its	Agua	Its
ARH°	7,14	4,0	-3,14	Arena	kg	Arena	kg
EFC	1,3		-1,3	Gravilla	kg	Gravilla	kg
				ARH°	kg	ARH°	kg
				EFC	kg	EFC	kg

Fuente: elaboración propia

Tabla 7.21 Dosificación con corrección de humedad de áridos, 2

					MEZCLA B						
		%			Dosificación corregida				VIGAS H-AR 20-25%		
ARIDOS	ABSORCION	HUMEDAD	DIFERENCIA		Cantidad de hormigon (Its)	1000			Cantidad de hormigon (Its)	45	
ARENA	1,4	3,0	1,6		Cemento	kg			Cemento	kg	15,1
GRAVILLA	1,22	1,0	-0,22		Agua	Its			Agua	Its	8,4
ARH*	7,14	4,0	-3,14		Arena	kg			Arena	kg	25,5
EFC	1,3	0,4	-0,9		Gravilla	kg			Gravilla	kg	36,8
					ARH*	kg			ARH*	kg	8,2
					EFC	kg			EFC	kg	11,6
					MEZCLA B						
		%			Dosificación corregida				CUBOS H-AR 20-25%		
ARIDOS	ABSORCION	HUMEDAD	DIFERENCIA		Cantidad de hormigon (Its)	1000			Cantidad de hormigon (Its)	15	
ARENA	1,4	3,0	1,6		Cemento	kg			Cemento	kg	5,0
GRAVILLA	1,22	1,0	-0,22		Agua	Its			Agua	Its	2,8
ARH*	7,14	4,0	-3,14		Arena	kg			Arena	kg	8,5
EFC	1,3	0,4	-0,9		Gravilla	kg			Gravilla	kg	12,3
					ARH*	kg			ARH*	kg	2,7
					EFC	kg			EFC	kg	3,9
					MEZCLA C						
		%			Dosificación corregida				VIGAS H-AR 20-50%		
ARIDOS	ABSORCION	HUMEDAD	DIFERENCIA		Cantidad de hormigon (Its)	1000			Cantidad de hormigon (Its)	45	
ARENA	1,4	4,0	2,6		Cemento	kg			Cemento	kg	15,1
GRAVILLA	1,22	3,0	1,78		Agua	Its			Agua	Its	7,7
ARH*	7,14	4,0	-3,14		Arena	kg			Arena	kg	17,2
EFC	1,3	0,4	-0,9		Gravilla	kg			Gravilla	kg	37,5
					ARH*	kg			ARH*	kg	8,2
					EFC	kg			EFC	kg	23,2
					MEZCLA C						
		%			Dosificación corregida				CUBOS H-AR 20-50%		
ARIDOS	ABSORCION	HUMEDAD	DIFERENCIA		Cantidad de hormigon (Its)	1000			Cantidad de hormigon (Its)	15	
ARENA	1,4	4,0	2,6		Cemento	kg			Cemento	kg	5,0
GRAVILLA	1,22	3,0	1,78		Agua	Its			Agua	Its	2,6
ARH*	7,14	4,0	-3,14		Arena	kg			Arena	kg	5,7
EFC	1,3	0,4	-0,9		Gravilla	kg			Gravilla	kg	12,5
					ARH*	kg			ARH*	kg	2,7
					EFC	kg			EFC	kg	7,7

Fuente: elaboración propia

7.6 Ensayo Asentamiento de cono

La siguiente tabla presenta los valores obtenidos de asentamiento de cono de cada mezcla confeccionada.

Tabla 7.22 Valores medidos de asentamiento de cada mezcla

	Patrón	MEZCLA A	MEZCLA B	MEZCLA C
		H-AR 20%-0%	H-AR 20%-25%	H-AR 20%-50%
	3,0	3,0	4,0	3,5
	4,5	2,0	2,5	3,5
	3,0	4,0	4,0	4,0
	4,5	2,0	2,5	3,5
Media	3,8	2,8	3,3	3,6
Desv. Estand	0,866	0,957	0,866	0,250

Fuente: elaboración propia

7.7 Ensayos mecánicos del hormigón

En las siguientes tablas se presentan los resultados obtenidos del ensayo a compresión de 7 y 28 días de las distintas mezclas.

Tabla 7.23 Resultado a compresión, 7 días

ENSAYO A COMPRESION - EDAD 7 DIAS						
	Tipo mezcla	Muestras	carga (kgf)	R fc (Mpa)	Rm fc (Mpa)	σ
	PATRON	m1	33100	14,2		
		m2	37500	16,3	15,43	1,10
		m3	36200	15,8		
MEZCLA A	H-AR 20%-0%	m1	31784	13,7		
		m2	32831	14,2	14,07	0,32
		m3	32926	14,3		
MEZCLA B	H-AR 20%-25%	m1	32604	14,1		
		m2	33841	14,7	14,47	0,32
		m3	33889	14,6		
MEZCLA C	H-AR 20%-50%	m1	37590	16,2		
		m2	37195	16	16,37	0,47
		m3	39325	16,9		

Fuente: elaboración propia

Tabla 7.24 Resultado a compresión, 28 días

ENSAYO A COMPRESION - EDAD 28 DIAS						
	Tipo mezcla	Muestras	carga (kgf)	R fc (Mpa)	Rm fc (Mpa)	σ
	PATRON	m1	49950	21,5		
		m2	52050	22,4	21,83	0,49
		m3	50971	21,6		
MEZCLA A	H-AR 20%-0%	m1	54291	20,5		
		m2	53061	21,1	20,77	0,31
		m3	55279	20,7		
MEZCLA B	H-AR 20%-25%	m1	50901	21,9		
		m2	51516	22,3	22,30	0,40
		m3	52578	22,7		
MEZCLA C	H-AR 20%-50%	m1	55279	24,0		
		m2	54349	23,6	23,72	0,21
		m3	54650	23,7		

Fuente: elaboración propia

Las siguientes tablas presentan los resultados obtenidos de flexotracción a 7 y 28 días de las distintas mezclas.

Tabla 7.25 Resultado a flexotracción, 7 días

		ENSAYO A FLEXOTRACCION - 7 DIAS				
		Muestra	Carga (kgf)	R ft (Mpa)	Rm ft (Mpa)	σ
	PATRON	m1	1986	3,75		
		m2	1844	3,58	3,7	0,10
		m3	1926	3,76		
MEZCLA A	H-AR 20%-0%	m1	1430	2,76		
		m2	1994	3,9	3,4	0,57
		m3	1791	3,42		
MEZCLA B	H-AR 20%-25%	m1	1751	3,4		
		m2	1693	3,3	3,5	0,24
		m3	1909	3,76		
MEZCLA C	H-AR 20%-50%	m1	1868	3,65		
		m2	2021	3,91	3,8	0,14
		m3	1901	3,70		

Fuente: elaboración propia

Tabla 7.26 Resultado a flexotracción, 28 días

		ENSAYO A FLEXOTRACCION- 28 DIAS				
		Muestra	Carga (kgf)	R ft (Mpa)	Rm ft (Mpa)	σ
	PATRON	m1	2280	4,40		
		m2	2210	4,22	4,36	0,12
		m3	2290	4,46		
MEZCLA A	H-AR 20%-0%	m1	2350	4,50		
		m2	2260	4,40	4,40	0,10
		m3	2250	4,30		
MEZCLA B	H-AR 20%-25%	m1	2375	4,50		
		m2	2260	4,40	4,33	0,21
		m3	2120	4,10		
MEZCLA C	H-AR 20%-50%	m1	2382	4,49		
		m2	2323	4,45	4,58	0,19
		m3	2483	4,79		

Fuente: elaboración propia

7.8 Densidad aparente del hormigón

En las siguientes tablas se presentan los datos tomados con respecto al ensayo de densidad aparente de las distintas probetas confeccionadas.

Tabla 7.27 Densidad aparente probetas cubicas, 7 y 28 días

		PROBETAS CUBICAS 7 DIAS					DIFERENCIA
		muestra	peso (kg)	vol (m3) x 10^(-3)	pap (Kg/m3)	pap m (kg/m3)	%
	PATRON	M1	8,244	3,4258	2406	2405	100
		M2	8,128	3,3863	2400		
		M3	8,142	3,3806	2408		
MEZCLA A	H-AR 20%-0%	M1	8,115	3,4128	2378	2371	98,6
		M2	8,028	3,3919	2367		
		M3	8,045	3,3975	2368		
MEZCLA B	H-AR 20%-25%	M1	8,399	3,4343	2446	2452	102,0
		M2	8,26	3,3833	2441		
		M3	8,447	3,4372	2458		
MEZCLA C	H-AR 20%-50%	M1	8,621	3,4230	2519	2533	105,3
		M2	8,683	3,4315	2530		
		M3	8,771	3,4601	2535		
		PROBETAS CUBICAS 28 DIAS					DIFERENCIA
		muestra	peso (kg)	vol (m3) x 10^(-3)	pap (Kg/m3)	pap m (kg/m3)	%
	PATRON	M1	8,216	3,4386	2389	2407	100
		M2	8,137	3,4015	2392		
		M3	8,247	3,3821	2438		
MEZCLA A	H-AR 20%-0%	M1	8,150	3,4089	2391	2390	99,3
		M2	8,080	3,3919	2382		
		M3	8,105	3,3806	2398		
MEZCLA B	H-AR 20%-25%	M1	8,390	3,4400	2439	2447	101,7
		M2	8,397	3,4230	2453		
		M3	8,429	3,4485	2444		
MEZCLA C	H-AR 20%-50%	M1	8,621	3,3890	2544	2547	105,8
		M2	8,671	3,3975	2552		
		M3	8,646	3,3975	2545		

Fuente: elaboración propia

Tabla 7.28 Densidad aparente probetas prismáticas, 7 y 28 días

		PROBETAS PRISMATICAS 7 DIAS					DIFERENCIA
		muestra	peso (kg)	vol (m3) x 10 [^] (-2)	ρap (Kg/m3)	ρap m (kg/m3)	%
	PATRON	M1	29,86	1,2457	2397	2392	100
		M2	29,79	1,2424	2398		
		M3	32,27	1,3545	2382		
MEZCLA A	H-AR 20%-0%	M1	29,88	1,2524	2386	2380	99,5
		M2	29,69	1,2425	2390		
		M3	30,02	1,2690	2366		
MEZCLA B	H-AR 20%-25%	M1	29,71	1,2441	2388	2411	100,8
		M2	30,00	1,2391	2421		
		M3	32,35	1,3446	2406		
MEZCLA C	H-AR 20%-50%	M1	31,03	1,2424	2498	2476	103,5
		M2	31,04	1,2458	2492		
		M3	30,98	1,2549	2469		
		PROBETAS PRISMATICAS 28 DIAS					DIFERENCIA
		muestra	peso (kg)	vol (m3)x 10 [^] (-2)	ρap (Kg/m3)	ρap m (kg/m3)	%
	PATRON	M1	29,93	1,2491	2396	2399	100
		M2	29,84	1,2407	2405		
		M3	32,63	1,3617	2396		
MEZCLA A	H-AR 20%-0%	M1	30,03	1,2557	2391	2386	99,4
		M2	29,81	1,2516	2382		
		M3	32,63	1,3690	2383		
MEZCLA B	H-AR 20%-25%	M1	30,65	1,2607	2431	2482	103,4
		M2	31,38	1,2540	2502		
		M3	30,89	1,2499	2471		
MEZCLA C	H-AR 20%-50%	M1	31,82	1,2707	2504	2527	105,3
		M2	31,64	1,2574	2516		
		M3	31,64	1,2491	2533		

Fuente: elaboración propia