



FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

**Caracterización del comportamiento físico y mecánico de
hormigones fabricados con escoria de cobre como
reemplazo total del árido.**

Por

Diego Bernal Vásquez

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

Prof. Guía: Juan Eduardo Egaña Ramos

Abril, 2018

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a mi familia, en especial a mis padres, Lalo y Sandra, por ser un pilar fundamental, para poder desarrollarme en mi vida universitaria, sin ellos no hubiera tenido la posibilidad de estudiar y mucho menos poder sacar adelante esta larga y compleja carrera, que estoy finalizando con esta interesante investigación. Por siempre darme una palabra de aliento y motivarme a sacar esto adelante este complejo camino, no puedo dejar fuera a mi hermana Karina que a pesar de la distancia siempre ha estado presente junto a su hermosa familia, a mi polola Andrea por apoyarme y entenderme en todo momento aun en los más complejos siempre alentarme y motivarme a seguir adelante y no decaer.

Agradecimiento

Quiero agradecer a todas las personas que me han ayudado con un granito a lo extenso de este camino.

En primer lugar, agradecer a mi profesor guía Don Juan Egaña por guiarme y apoyar en mi investigación desinteresadamente, traspasar todo su conocimiento y experiencia hacia mi persona para esta investigación, agradecer a los profesores de la Escuela de Ingeniería en Construcción por apoyarme, en especial a don Andrés Jamett.

También debo agradecer al personal del laboratorio de la Escuela de Ingeniería en Construcción por ayudarme y poner todo su tiempo a mi disposición muchas veces fuera de su horario de trabajo, en especial a don Enrique.

Debo sin duda agradecer a dos personas que siempre han sido lo más abiertas a resolver problemas, escucharme y muchas veces ser confidente de los problemas de universidad, ellas son Emperatriz y Fabiola que desde primer año a hoy que me encuentro finalizando este camino siempre han estado presentes y con la mejor disposición.

Para finalizar debo agradecer a mis amigos, tanto de la vida como de la universidad, que sin duda son mi segunda familia y parte fundamental para lograr esta linda etapa, de la vida mencionar a Gabriela Olivares, Simón Olivares, Joaquín Fernández, Paul Maraboli, Felipe Maraboli y Miguel Escobar y de la Universidad mencionar en primer lugar a Katherine Cisterna, Sira Sandoval, Fernando Terraza Y Jerson Perez que son mis amigos y cómplices desde el primer año de universidad, continuar con Cristian, Marcel, Ignacio, Miguel, Fernanda, David y Felipe que con los años se ha ido formando una bonita amistad, todos ellos son parte fundamental para poder haber llegado a esta etapa final, de mi carrera y poder lograr el anhelado objetivo que es conseguir mi carrera, agradecer cada momento que hemos pasado junto y apoyo brindado.

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTO	3
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABLAS	10
RESUMEN.....	11
ABSTRACT	12
1.- CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES	13
1.1.- Introducción	14
1.2.-Objetivos	15
1.2.1.-Objetivo General.....	15
1.2.2.-Objetivos Específicos.	15
1.3.- Alcances y limitaciones	16
1.4.- Estructura de la tesis	17
2. CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	18
2.1.- La Industria de Cobre Nacional.	19
2.1.1.- Proceso de Producción.....	19
2.1.2.- El cobre y la economía chilena.....	21
2.1.3.- Consecuencias de la producción de cobre.....	21
2.2.- Usos y Estudios de la Escoria de Cobre	23
2.2.1.- Usos a nivel internacional.....	23
2.2.2.- Usos a nivel nacional.....	23
2.2.3.- Estudios de la escoria de cobre en hormigones en la carrera de Ingeniería en Construcción de la Universidad de Valparaíso	24

2.3.- Características químicas de la escoria de cobre de Fundición Ventanas	25
2.4.- Composición química Escoria de Cobre División Ventanas.....	26
2.5.- Áridos.....	27
2.6.-Sulfatos Solubles en agua	29
2.7.- Hormigones alta densidad.....	30
2.7.1.- Qué son los hormigones alta densidad	30
2.7.2.- Usos de hormigones de alta densidad.....	30
2.7.3.- Propiedades hormigón de alta densidad	31
3. CAPÍTULO 3: PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	33
3.1.- Metodología.....	34
3.1.1.- Secuencia metodológica.....	34
3.1.2.- Diagrama de Flujo.....	36
3.1.3.- Diseño experimental	37
a.-Generalidades.....	35
b.-Porcentaje de reemplazo de áridos.....	36
c.-Tipo de cemento.....	36
d.-Tamaño máximo nominal del árido (Dn).....	36
e.-Razón agua cemento.....	36
f.-Edad del hormigón.....	36
3.1.4.- Caracterización de áridos.....	39
a.-Generalidades.....	38
b.-Normativa para la caracterización de los áridos.....	38
3.1.5.- Preparación de las mezclas de hormigón.....	41
3.1.6.- Probetas para las muestras de hormigón.....	41
3.1.7.- Ensayos de resistencias mecánicas.....	42
a.-Ensayo a compresión.....	41
b.-Ensayo a tracción por flexión.....	41
3.1.8.- Sulfatos Solubles en agua.....	43
3.2.- Tipo de Investigación.....	43

3.3.- Extracción del material de escoria	43
3.4.- Caracterización granulométrica de escoria.....	45
3.5.- Ensayos de caracterización	47
3.5.1.- Ensayos a material grueso de Escoria de Cobre	47
a.-Granulometría.....	46
b.-Determinación de las densidades real y neta y absorción de agua de la grava escoria:.....	48
c.-Determinación de la densidad aparente de la grava escoria	48
3.5.2.- Ensayos a material fino de Escoria de Cobre.....	48
a.-Granulometría.....	47
b.-Material menor que 0,08 mm presente en la arena de Escoria de Cobre...,.....	47
c.-Determinación de las densidades real y neta y absorción de agua de la Escoria de Cobre.....	48
d.- Determinación de la densidad aparente de la Escoria de Cobre.....	48
3.5.3.- Ensayos a material grueso de Árido Convencional.	51
a.- Granulometría.....	50
b.- Detemrinación de las densidades real y neta y absorción de agua del árido convencional.....	50
c.-Determinación de la densidad aparente de la grava árido convencional.....	52
3.5.4.- Ensayos a material fino de árido convencional	52
a.-Granulometría.....	51
b.-Determinación de las densidades real y aparente y absorción de agua del árido convencional.....	52
c.-Determinación de la densidad aparente del árido convencional.....	52
3.6.- Dosificaciones	54
3.6.1.- Dosificación H-30	55
a.-Dosificación H-30 Árido convencional y Escoria de Cobre por m ³	54
3.6.2.- Dosificación H-50	55
a.-Dosificación H-50 Árido convencional y Escoria de cobre por m ³	54
4. CAPÍTULO 4: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	56
4.1.- Generalidades.....	57

4.2.- Docilidad Hormigones.	57
4.2.1.- Asentamientos Hormigón H-30	57
4.2.2.- Docilidad Hormigón H-50	58
4.3.- Resultados resistencias a compresión.....	59
4.3.2.- Resistencia promedio hormigones grado H 50	59
4.4.- Resultados resistencia a flexo-tracción	60
4.4.1.- Resistencia promedio hormigones grado H 30	60
4.4.2.- Resistencia promedio hormigones grado H 50	61
4.5.- Densidad aparente del hormigón.....	62
4.6.- Contenido de Sulfatos en la escoria	63
 CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y PROPOSICIONES DE FUTURAS	
INVESTIGACIONES.	65
5.1.- Conclusiones	66
5.2.- Futuras investigaciones	67
 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	68
 Anexo A.- Granulometría	70
A.1.- Granulometría Árido convencional.....	70
A.2.- Granulometría Escoria de Cobre.	73
Anexo B	76
B.1.- Resistencia a la compresión.....	76
B.2.- Resistencia a la Flexo-Tracción.....	80
Anexo C	84
C.1.- Densidad Aparente.....	84
C.1. 2.- Densidad aparente hormigón H-50.	85
Anexo D	86
D.1.- Generalidades dosificación.....	86
D.2.- Resistencia media Requerida	86

D.3.- Dosis de Cemento	88
D.4.- Estimación de la dosis de agua de amasado en función de la dosis de cemento y del tamaño máximo nominal D_n del árido.....	89
D.5.- Determinación del peso del m³ de hormigón	90
Anexo E	92
E.1.- Informe de laboratorio.....	92

Lista de Figuras

Figura 2. 1 Proceso fundición del cobre.	20
Figura 2. 2 Hormigón de alta densidad en central nuclear	28
Figura 3. 1 Metodología de la investigación.....	36
Figura 3. 2 Probeta cúbica, sometida a pruebas de compresión.....	42
Figura 3. 3 Probeta prismática, sometida a pruebas de tracción por flexión.	42
Figura 3. 4 Sectores de acopio y retiro de materiales en el depósito Fundición Ventanas.	44
Figura 3. 5 Zonas de extracción de muestras de escoria de cobre del depósito Fundición Ventanas.....	45
Figura 3. 6 Granulometría grava escoria de cobre.	47
Figura 3. 7 Granulometría arena escoria de cobre.	49
Figura 3. 8 Granulometría grava árido convencional.	52
Figura 3. 9 Granulometría arena árido convencional.	53
Figura 4. 1 Gráfica docilidad asentamientos hormigones	58
Figura 4. 2 Resistencia a compresión hormigones H-30	60
Figura 4. 3 Resistencia promedio a flexo- tracción	61
Figura 4. 4 Comparación de densidades hormigón.....	63

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Composición química escoria de cobre división Ventanas.....	26
Tabla 2.2 Volúmenes esperados de consumo de áridos en el país y RM.....	28
Tabla 3. 1 Resumen probetas a realizar con escoria de cobre.	37
Tabla 3. 2 Resumen probetas a realizar con árido convencional.	37
Tabla 3. 3 Serie de tamices a utilizar en clasificación de áridos.	39
Tabla 3. 4 Tamaño de la muestra de ensayos de grava.....	46
Tabla 3. 5 Material grueso y fino de la escoria de cobre	46
Tabla 4. 1 Resumen asentamiento hormigón H-30	57
Tabla 4. 2 Resumen asentamiento hormigón H-50.	58
Tabla 4. 3 Resumen promedio hormigón H-30	59
Tabla 4. 4 Resumen promedio hormigón H-50	59
Tabla 4. 5 Resistencia promedio hormigón H-30	60
Tabla 4. 6 Resistencia promedio hormigón H-50	61
Tabla 4. 7 Densidades aparentes hormigones grado H-30	62
Tabla 4. 8 Densidades aparentes hormigones grado H-50	62
Tabla 4. 9 Medición Sulfatos en referencia a la NCh 1444/1. Of 2010	63

Resumen

Esta investigación pretende ser una herramienta que facilite e incentive uso de escoria de Cobre en hormigones. En la presente investigación se exponen la experiencia desarrollada en el Laboratorio de Hormigones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Valparaíso, analizando y evaluando el reemplazo total de árido pétreo en hormigones por Escoria de Cobre proveniente de la Fundición Codelco Ventanas, tanto en las propiedades físicas como mecánicas.

Se verifico la homogeneidad del depósito Maitenes, se caracterizó la Escoria de Cobre comparándola con un árido pétreo, demostrando que cumple con los requisitos presentes en la normativa nacional, se determinó el nivel de sulfatos presentes en la escoria, detectándose una porción insignificante para el estudio.

Se fabricaron hormigones, con reemplazo total del árido pétreo por Escoria de Cobre, se diseñaron para 2 niveles de resistencia H-30 y H-50 tanto con Escoria como con árido convencional.

En ambos niveles de resistencia se lograron aumentar al emplear escoria: en compresión, el nivel H-30 tuvo aumentar de un 51% y el hormigón H-50 logro aumentar de un 10%, en flexotracción, el nivel H-30 logro un incremento del 39% y el grado H-50 un 4%.

Desde el punto de vista de la densidad aparente ambos niveles lograron densidades aparentes mayores que sus pares con árido pétreo convencional en el grado H-30 un incremento del 29% y por su parte el hormigón H-50 de un 33%, ambos niveles de hormigón superando los 3.000 Kg/m³ pudiendo ser denominados hormigones alta densidad.

Abstract

This research aims to be a tool that facilitates and encourages the use of Copper slag in concrete. In the present investigation the experience developed in the Concrete Laboratory of the Faculty of Engineering of the University of Valparaíso is exposed, analyzing and evaluating the total replacement of stone aggregate in concretes by Copper Slag from the Codelco Ventanas Smelter, both in the physical as well as mechanical properties.

The homogeneity of the Maitenes deposit was verified, the Copper Slag was characterized comparing it with a stone aggregate, demonstrating that it meets the requirements present in the national regulations, the level of sulphates present in the slag was determined, detecting an insignificant portion for the study .

Concretes were manufactured, with the total replacement of the stone aggregate by Copper Slag imitating the granulometry of the aggregate used, they were designed for 2 levels of resistance H-30 and H-50 both with slag and in conventional aggregate.

In both levels of resistance improvements were achieved, for its part in compression, the H-30 level had improvements of 51%, for its part the H-50 concrete achieved improvements of 10% and in flexotraction the H-30 level achieved a increase of 39% and grade H-50 by 4%.

From the point of view of the apparent density, both levels achieved greater apparent density than their pair with conventional stone aggregate in the H-30 grade, an increase of 29% and, on the other hand, the H-50 concrete of 33%, both levels of concrete exceeding 3,000 kg / m³, which can be called high density concretes.

Capítulo 1: Antecedentes Generales

1.1.- Introducción

La economía chilena es dominada en gran parte por la industria del cobre, siendo uno de los mayores productores de este material de fundición en el mundo. Fiel reflejo de esta situación son las numerosas fundiciones nacionales: Caletones, Ventanas, Hernán Videla Lira, Potrerillos, Alto Norte y Chuquicamata entre otras. Esta cantidad de fundiciones genera un volumen importante de residuos, entre los cuales se encuentra la escoria de fundición de cobre.

Solo en el 2005 las fundiciones nacionales produjeron 1,6 millones de toneladas de cobre (13% del total mundial), y anualmente se generan 3,5 millones de toneladas de escorias (Cendoya, 2009)

La escoria de cobre es un residuo del proceso pirometalúrgico aplicado a los concentrados de minerales de cobre que ingresan a la fundición. La escoria habitualmente es depositada directamente en vertederos autorizados (Orizola, 2006).

En Chile, la escoria de cobre no tiene una reutilización de volumen considerable, esto genera grandes botaderos de este residuo los cuales van expandiéndose cada vez más. Por considerarse la escoria un pasivo ambiental, puede y es mantenida en los lugares de acopio por décadas, ocupando enormes aéreas de terreno, que quedan inutilizables y visualmente muy decaídas (Orizola, 2006).

La presente investigación propone, como primera etapa, realizar una caracterización física del depósito de la *Fundición de Cobre Ventanas, V Región*; logrando con esto determinar si el material de escoria acopiado presenta características apropiadas y compatibles con los requisitos establecidos por las normas chilenas sobre la confección de hormigones. Como estudio complementario se determinará si el contenido de sulfatos solubles al agua se encuentra dentro de los aceptados por la norma chilena.

Como segunda etapa y final la investigación busca ser una herramienta que determine si los hormigones confeccionados con escoria de cobre tienen las características, en su comportamiento físico y mecánico, similar o mejor a la de un hormigón confeccionado con árido convencional, para incentivar y facilitar el uso de escoria de cobre en hormigones y así disminuir el volumen del depósito Fundición Ventanas.

1.2.- Objetivos

1.2.1.- Objetivo General

Caracterizar el comportamiento tanto físico como mecánico de hormigones fabricados con reemplazo total de árido por escoria de cobre.

1.2.2.- Objetivos Específicos.

Caracterizar físicamente las escorias de cobre del depósito de la Fundición Ventanas.

Determinar el efecto del reemplazo de árido normal por escoria de cobre sobre las densidades, docilidad y absorción de agua, del hormigón.

Determinar el efecto del reemplazo de árido normal por escoria de cobre sobre la resistencia a la compresión y flexo-tracción, del hormigón.

Determinar la presencia de eventuales contenidos de sulfatos solubles en agua en las Escorias de Cobre, de la Fundición Ventanas.

1.3.- Alcances y limitaciones

Se tomarán 3 muestras de lugares representativos del depósito Maitenes, Fundición de Cobre Ventanas, apuntando a extraer muestras con diferente edad, con el objetivo de determinar la homogeneidad del depósito.

El cemento a utilizar será portland puzolánico grado corriente, por ser el más utilizado en las construcciones nacionales.

La grava de escoria de cobre a utilizar será de tamaño máximo nominal 40mm.

Los hormigones por confeccionar serán de grado H-30 y H-50, por ser un hormigón más común en la industria de la construcción, como lo es el H-30 y un hormigón de alta resistencia como el H-50.

1.4.- Estructura de la tesis

La estructura del presente estudio se divide en 5 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 y los alcances y limitaciones que encauzarán esta investigación.

El segundo capítulo información teórica relacionado al tema que trata la investigación, aspectos generales sobre la escoria de cobre e información sobre los áridos pétreos y su demanda actual.

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.

En el cuarto capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos en los ensayos realizados en laboratorio.

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

Capítulo 2: Marco Teórico

2.1.- La Industria de Cobre Nacional.

2.1.1.- Proceso de Producción

El cobre (Cu) es un material de importante demanda en la industria actual, debido a su elevada conductividad térmica y eléctrica, tenacidad, excelente maleabilidad, lo que le permite ser batido en planchas o láminas, y capacidad de extensión en filamentos, lo que lo hace el material principal para la elaboración de cables, alambres y láminas. El cobre es uno de los principales minerales presentes en la industria manufacturera, eléctrica, electrónica, en la construcción de maquinaria y automóviles, y como material bactericida.

La producción de cobre en Chile se concentra principalmente en las regiones de Tarapacá, Antofagasta, Atacama, Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana y del Lib. Gral. B. O'Higgins, estas reservas equivalen a poco menos del 40% de las reservas totales del planeta. El cobre puede ser encontrado de forma sulfurada u oxidada, de este origen se desprenden dos formas de procesar el material, para así obtener los cátodos requeridos en el mercado.

El mineral sulfurado es extraído de la mina, para luego, ser reducido en tamaño y así liberado de las especies valiosas que contiene, posteriormente se procede a concentrar el mineral, la fundición de éste y finalmente una etapa de electro-refinación para obtener los cátodos 99,99% de pureza. La etapa de fundición también es conocida como piro-metalurgia, debido a que se trabaja con hornos a altas temperaturas.

El mineral oxidado es extraído de la mina para luego, al igual que el sulfurado, ser reducido de tamaño y desprendido de especies valiosas, posteriormente pasa a una etapa de lixiviación y extracción por solventes para finalmente, por medio de una electro-obtención, producir los cátodos tan apetecidos por el mercado.

El presente trabajo centrará atención en el mineral sulfurado y su proceso piro-metalúrgico, ya que, es de los hornos incluidos en este proceso, de donde se obtiene la escoria de cobre de interés.

En la figura 2.1 se observan las diferentes etapas que conforman la obtención de cobre a partir de mineral sulfurado por la ruta piro-metalúrgica. Mediante procesos de secado y hornos a altas temperaturas se puede obtener el producto deseado, también se obtienen una serie de desechos, ya sean gaseosos, líquidos o sólidos, este último residuo de tipo sólido es de principal interés para la presente investigación, también denominado escoria.

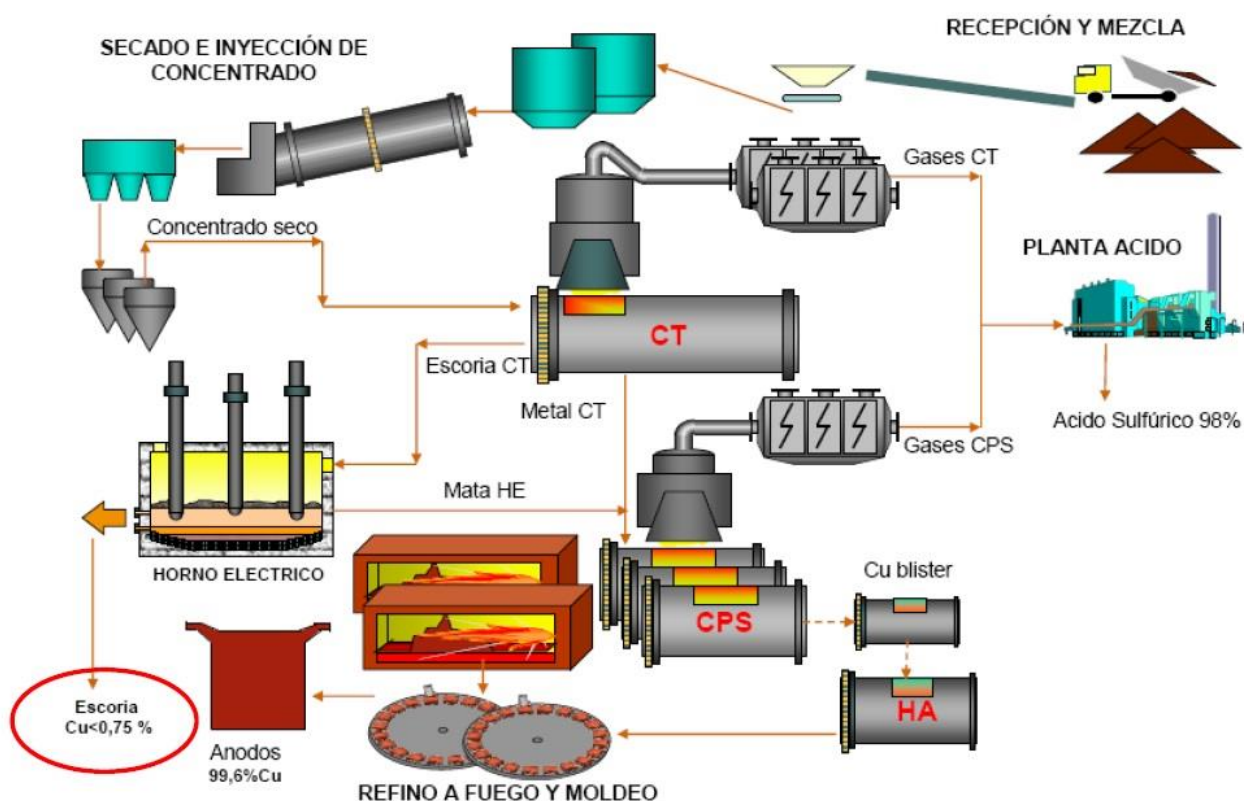


Figura 2. 1 Proceso fundición del cobre.

(Fuente: CODELCO)

2.1.2.- El cobre y la economía chilena

En las últimas décadas la economía chilena ha estado dominada por la producción de cobre. Esto se hace notar en Chile, con la existencia de siete fundiciones de cobre Chuquicamata (Calama), Alto Norte (Antofagasta), Potrerillos (El Salvador), Paipote (Copiapó), Hernán Videla Lira (Copiapó), Ventanas (Los Andes) y Caletones (Rancagua). Cada una de estas fundiciones genera grandes volúmenes de residuos, desechos y subproductos, entre los que encontramos polvos de fundición, ácido sulfúrico y escorias de fundición de cobre (EFC) (Cendoya, 2009a).

Se sabe, históricamente que la minería es el sector productivo que más aporta al Producto Interno Bruto nacional. En el año 2013, según información entregada por el Banco Central de Chile, la explotación minera contribuyó con más de 43.937 millones de dólares, lo que representa cerca del 16% del total nacional del PIB del país (Molina, 2014).

Se puede decir que “Chile es de cobre” y no podemos olvidar que sigue siendo el primer productor a nivel mundial, contando con las mayores reservas de este mineral a nivel planetario. Su participación en la producción mundial es de un 32% con 5,8 millones de toneladas métricas, según la información del Consejo Minero 2013 (Molina, 2014) No solo trae beneficios, también consecuencias, como es la contaminación.

2.1.3.- Consecuencias de la producción de cobre

Una de las mayores problemáticas que azotan las comunas de Quintero-Puchuncaví es la contaminación y depredación por parte de las empresas, Quintero y Puchuncaví acogen más de una docena de complejos industriales, incluyendo una refinería de petróleo estatal y la mayor fundición de cobre del país. En la zona se hallan dos puertos industriales y cuatro grandes plantas termoeléctricas (Carmona Jiménez & Jaimes Manosalva, 2015).

El hecho de que la bahía de Quintero se encuentre entre exclusivos balnearios recreativos, tales como Reñaca y Zapallar, zonas de alta valoración en el mercado inmobiliario, resalta la situación de desigualdad ambiental que se vive en la zona. En otras palabras deja ver el rol (político) del Estado y los grupos económicos más ricos y poderosos en la cartografía de la desigualdad ambiental, instalando actividades generadoras de riesgo y degradación ambiental

en áreas habitadas por comunidades de menores ingresos y de baja capacidad de resistencia a la llegada de las industrias (Alves, 2007).

El tamaño de los botaderos de escoria va creciendo año a año. Estudios realizados por diversas universidades nacionales han determinado que por cada tonelada de cobre producido se generan aproximadamente 2,2 toneladas de escoria (Concepción, 2005). Por lo que el tema de la reutilización de escorias se ha convertido en un punto de gran interés para las empresas metalúrgicas. La escoria de cobre se genera en todo el mundo, se producen cerca de 24,6 millones de toneladas de escoria anuales (Gorai, et al, 2003). Anualmente las fundiciones de cobre del país producen cerca de 13 millones de toneladas de desechos, cuyo único destino posible son los depósitos que se sitúan cerca de las plantas. Tan sólo la División El Teniente de Codelco, produce cerca de 700.000 toneladas de escoria al año. Se estima que Chile posee un volumen histórico acumulado de aproximadamente 50 millones de toneladas. (Cendoya, 2009b). En el año 2005 las fundiciones nacionales produjeron 1,6 millones de toneladas de cobre (13% del total mundial), lo que trae 4,5 millones de toneladas de escorias de cobre lo que corresponde a casi un 30% con respecto al total de desechos (Nazer et al, 2013). Para todo el 2016, se ha estimado que la producción de cobre llegaría a 5,77 millones de toneladas (agencia estatal Comisión Chilena del Cobre (Cochilco), lo que traería consigo 12,69 millones de toneladas de escoria de cobre.

En particular División Ventanas tiene una capacidad anual para el 2016 de producción de 420.000 toneladas en su fundición, lo que trae consigo prácticamente 1 millón de toneladas de escoria de cobre, es decir 270.000 m³ de este residuo. Esta escoria se acumula en canchas colindantes a cada planta industrial (Sepúlveda 2006), en particular las de fundición Ventanas son depositadas en Maitenes, localidad perteneciente a la comuna de Puchuncaví.

2.2.- Usos y Estudios de la Escoria de Cobre

2.2.1.- Usos a nivel internacional

A nivel internacional (Canadá, Estados Unidos) se ha utilizado con buenos resultados como base granular en la construcción de caminos, líneas férreas y terraplenes (Mobasher & Ariño, 1996). En Brasil, se ha estudiado la influencia de la utilización de escoria como adición en el cemento y como agregado fino (Moura & Coutinho, 2004), mezclas de hormigón con distintas proporciones de escoria de cobre, como reemplazo parcial y total del agregado fino, utilizando como porcentaje de reemplazo en peso desde un 10 hasta un 100% de la arena utilizada (Al-Jabri, Taha, & Al-Ghassani, 2002b). En Japón, se han realizado investigaciones para el uso de diversos tipos de desechos industriales, incluyendo las escorias de cobre como agregado en el hormigón (Al-Jabri, Taha, & Al-Ghassani, 2002a).

2.2.2.- Usos a nivel nacional.

La utilización de escoria de cobre en la industria de la construcción no es nueva. A nivel nacional se ha utilizado en rellenos de caminos (estabilización de asfaltos), en la fabricación de lanas minerales (para aislamiento), en la fabricación de ladrillos refractarios y como material abrasivo para limpieza de superficies de acero (Sánchez et al., 2004). En el último tiempo se le ha empleado como antibacteriano, ya sea como revestimiento de superficie o en forma de fibras, para prendas de vestir

2.2.3.- Estudios de la escoria de cobre en hormigones en la carrera de Ingeniería en Construcción de la Universidad de Valparaíso

Los estudios relacionados con la escoria de cobre y hormigones son diversos destacando entre ellos y de mayor relevancia para la presente investigación los estudios de:

Gálvez (2014) “Prospección y Caracterización de las Escorias de Cobre del Depósito Fundición Ventanas. Estudio de Factibilidad para su empleo en Hormigones”, concluyendo que el depósito Fundición Ventanas presenta las mismas características granulométricas en toda su extensión, de esta forma se define el depósito de Fundición Ventanas como homogéneo en toda su extensión, En ensayos de compresión la mezcla compuesta por grava de escoria y arena convencional, no presentó diferencias significativas con respecto a un hormigón patrón de árido convencional, esta mezcla mostró una mejora de un 3% aproximadamente.

Morales (2013) “Influencia de la incorporación de Escoria de Cobre sobre la Durabilidad de Hormigones”. En relación al ensayo de penetración de aire con equipo Permea – Torr, los hormigones con escoria de cobre presentan el mismo comportamiento que el hormigón patrón. La resistividad eléctrica en hormigones con escoria de cobre presenta un comportamiento no lineal a medida que se aumente la sustitución de escoria de cobre. El mayor valor de resistividad presentado se encuentra en un 25%, luego de esto, este valor disminuye. Todos los hormigones estudiados presentan características de resistividad eléctrica favorables, por lo tanto se concluye que no presentarían ningún problema en ser aplicados en soluciones constructivas con armaduras, confeccionando así un hormigón armado.

Catalán (2016) “Valorización de residuos industriales como áridos para el hormigón, Influencia sobre las propiedades físicas y mecánicas” Respecto a la densidad de las partículas de escoria de cobre y árido reciclado de hormigón su uso en las mezclas de hormigón, afectan directamente en las propiedades físicas. Específicamente las escorias de cobre aumentan la densidad aparente del hormigón y los áridos reciclados de hormigón la disminuyen. Sin embargo, esto también se relaciona con la cantidad de sustitución del árido.

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 escoria de cobre

y árido reciclado de hormigón 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 escoria de cobre, que en este amasado corresponde a la porción de escoria de cobre mayor, 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 de escoria de cobre y árido reciclado de hormigón, permite asimilar las propiedades resistentes a compresión del hormigón.

2.3.-Características químicas de la escoria de cobre de Fundición Ventanas

La escoria se forma a partir de los óxidos contenidos en la carga del horno y de los óxidos de hierro que se producen por la oxidación durante el proceso piro-metalúrgico. Depende de la naturaleza de los minerales, de los concentrados, de los fundentes, de las condiciones de operación y de otros diversos factores. Los óxidos fundamentales que se presentan en la escoria son: (Galvez, 2014).

- Óxidos de hierro (FeO , Fe_3O_4) de 30 – 40 %
- Óxidos de silicio (SiO_2) de 35 – 40 %
- Óxidos de aluminio (Al_2O_3) hasta 10 %
- Óxido de calcio (CaO) hasta 10 %

2.4.- Composición química Escoria de Cobre División Ventanas.

De la literatura se ha podido obtener que las escorias están compuestas por diversos elementos. En la tabla 2.1 se muestra un análisis químico de rutina que se efectúa regularmente por el laboratorio de Control de la Calidad de División Ventanas Codelco a la escoria del depósito, la cual es de interés para la presente investigación.

Tabla 2.1 Composición química escoria de cobre división Ventanas.

COMPONENTE	SIMBOLO	COMPOSICION
Cobre	Cu	0.800 %
Arsénico	As	0.006 %
Antimonio	Sb	0.008 %
Sílice	SiO ₂	25.950%
Azufre	S	0.372 %
Hierro	Fe	41.760%
Magnetita	Fe ₃ O ₄	10.000%

(Fuente: Control de Calidad, Codelco Ventanas)

Como se observa de la Tabla 2.1, la escoria de fundición posee una serie de compuestos de importancia industrial, que si pudieran ser recuperados, podrían tener un interés económico considerable. Uno de los elementos que se encuentra en la escoria en mayor porcentaje es el hierro, que es de gran importancia para la industria siderúrgica. El hierro es un recurso no renovable, por lo que continuamente las empresas de extracción de ese rubro están buscando alternativas de obtención de este mineral, lo que significaría que su recuperación desde las escorias de fundición generaría un importante aporte para dichas empresas.

2.5.- Áridos.

Los áridos se pueden definir como el conjunto de fragmentos de materiales pétreos suficientemente duros, de forma estable e inerte en los cementos y mezclas asfálticas, que se emplean en la fabricación del mortero, del hormigón y bases estabilizadas (Ebensperger, 2003). Los áridos deben conformar el esqueleto o estructura base del hormigón. Este esqueleto debe ser lo más robusto, grande e inerte posible. Es decir, en cada unidad volumétrica de hormigón debe existir la mayor cantidad posible de áridos y con el mayor tamaño compatible con los demás requisitos que deba cumplir la mezcla. De esta forma se obtendrá el hormigón más estable y económico. A pesar de ser considerados como un verdadero relleno o "agregado" para el hormigón, nunca debemos menospreciar la importancia de los áridos. Sus características, buenas o malas, se transmitirán directamente al hormigón del cual forman parte. Normalmente, ocupan alrededor de un 75 % del volumen total del hormigón, y por lo tanto, es fácil entender su importancia relativa (Melón). La densidad de los áridos debe estar entre los 2000-3000 Kg/m³ (NCh 163), la escoria de cobre presenta una densidad real (árido sss) de 3797 kg/m³ (Galvez, 2014). La industria del árido es una industria atomizada, de presencia nacional y conformada en su mayoría por empresas pequeñas de orden local. Existen empresas de mayor envergadura, asociadas a empresas hormigoneras o cementeras y otras independientes, que extraen desde cauces o pozos secos (Sotomayor, 2009). Los áridos a nivel internacional son una materia prima imprescindible en la construcción de edificios e infraestructuras de un país. Son la segunda materia prima más consumida, después del agua. La industria del árido representa un negocio de aprox. 150 MMUS\$/año, con un volumen de ventas anual de 22 millones de m³ (Ebensperger, 2001). Basta decir que cada persona consume en su vida cerca de 850.000 kilos de áridos, más de 10.000 veces su peso (Lues, 2010).

En nuestro país de acuerdo a cifras disponibles, se estima que la extracción de áridos asciende a 7 millones 500 mil metros cúbicos por año, de los cuales cinco millones corresponden a gravas, gravilla y arenas, el resto se divide entre estabilizados (bases y sub-bases de pavimentos) y puzolanas (fabricación de cemento).

Tabla 2.2 Volúmenes esperados de consumo de áridos en el país y RM

Consumo de aridos (mil. M3)	1999		2005	
	País	RM	País	RM
Hormigon	14,4	6,3	17,8 a 27,1	7,9 a 12,0
Asfalto	2,5	1,25	2,9 a 4,4	1,4 a 2,2
Total	16,9	7,55	20,7 a 31,5	9,3 a 14,2

(Fuente: CDT- Industria del árido en Chile, 2001)

Si se considera que Chile proyecta sumar otras 140.000 hectáreas a las ya 170.000 superficies urbanas existentes a nivel nacional, hacia 2030 (Ministerio de Vivienda y Urbanismo), la cifra se vería afectada si la formación natural de sedimentos comienza a bajar.

2.6.- Sulfatos Solubles en agua

En los depósitos de áridos, suelen encontrarse sulfatos solubles en agua, cuando el contenido de esos sulfatos sobrepasa los límites establecidos en la normalización correspondiente, se puede producir ataque contra el hormigón. Posiblemente las escorias pueden contener sulfatos solubles en agua en proporciones en este momento desconocidas, lo que implicaría un riesgo para su empleo en hormigones,

El ataque de sulfatos en el hormigón está considerado como un mecanismo de degradación sumamente agresivo, ya que actúa directamente sobre la integridad de la matriz cementicia modificando sus características de diseño. Las sales de sulfatos están presentes principalmente en suelos selenitosos, agua de mar y aguas residuales de procesos industriales (Bernal, et al, 2013). La acción del ion SO_4^{2-} puede conducir a expansiones y fisuraciones del hormigón, debido a la formación de etringita al combinarse con los aluminatos de calcio hidratado (Mahmoud Abdelkader, 2010). Diversos estudios identifican el sulfato sódico (NaSO_4) y el sulfato magnésico (MgSO_4) como los principales compuestos químicos en disolución en contacto con el hormigón. El primero reacciona principalmente con el hidróxido cálcico para formar sulfato cálcico (yeso), que subsecuentemente en presencia de aluminato tricálcico (C_3A) formarán monosulfoaluminatos y etringita. Mientras el sulfato magnésico reacciona principalmente con los productos hidratados del cemento formando yeso e hidróxido de magnesio (A. Neville, 2004). La aparición de brucita tiende a reducir la permeabilidad del hormigón protegiendo las capas internas. Sin embargo, esta formación de brucita puede llegar a reducir la estabilidad de los silicatos cálcicos hidratados (gel C-S-H) en la pasta del cemento provocando una reducción de la resistencia a compresión (Shah & Hookham, 1998).

La velocidad de ataque de los sulfatos depende de la concentración de éstos en la solución, los efectos llegan a ser sensibles para concentraciones por encima 1% y 0.5%, en el caso del sulfato sódico y sulfato magnésico, respectivamente (Eglinton, 1998). La vía de acción del sulfato depende del tipo de catión que lo acompaña (Baghabra, et al, 1995). La formación de yeso y sus efectos durante el ataque de sulfatos en el hormigón, no están del todo definidos. Los investigadores advierten de expansiones y subsecuente agrietamiento del hormigón (Tian & Cohen, 2000). Por otra parte Mather (Mather, 1997) señala que no existe evidencia de expansiones significativas durante la formación de yeso derivado del ataque por

sulfatos sobre la pasta de cemento. Las investigaciones (Rasheeduzzafar, et al, 1994) en muestras de morteros y pasta sumergidas en soluciones de sulfato sódico y sulfato magnésico, señalan que los daños se presentaron principalmente por desprendimiento y reblandecimiento, siendo menor el grado de agrietamiento mostrado, produciéndose además una reducción considerable de la resistencia a compresión. El medio agresivo de sulfato magnésico está considerado de mayor grado de agresividad que el sulfato sódico, debido al descenso del pH de la solución de los poros en la pasta de cemento hidratada (Mehta, 1992).

2.7.- Hormigones alta densidad

Posiblemente en la confección de hormigones con reemplazo total del árido por escoria de cobre, nos encontremos con hormigones de alta densidad, debido a la alta densidad que presenta la escoria de cobre.

2.7.1.- Qué son los hormigones alta densidad

El hormigón de alta densidad se define convencionalmente como aquellos hormigones con densidad superior a 3.000 Kg/m^3 . En su confección se emplean minerales pesados o desechos metálicos, también se mezclan áridos pesados con áridos normales bajando los costos y la densidad, pero aumentando la tendencia a la segregación. Las resistencias de estos hormigones son algo superiores a las de hormigones tradicionales de igual razón agua/cemento. El mayor peso también es una exigencia adicional a la mezcladora y los moldajes y aumenta las dificultades en el transporte, colocación y compactación (Herrera, 2008).

2.7.2.- Usos de hormigones de alta densidad

El hormigón de alta densidad no es un material nuevo, se ha empleado durante muchos años como contrapeso en puentes levadizos. Su aplicación en la industria de la construcción comienza en los años 60 y coincide con el desarrollo de la energía nuclear, ya que sus propiedades son de utilidad como material de protección contra la radiación.

Hoy se utiliza como protección biológica de personas y material frente a los rayos X y rayos gamma en radiografía industrial y en instalaciones de terapia médica, así como en aceleradores de partículas y reactores nucleares.



Figura 2.2 Hormigón de alta densidad en central nuclear

(Fuente: Franco Paredes, 2013)

2.7.3.- Propiedades hormigón de alta densidad

Las propiedades del hormigón de gran peso, sea este en estado fresco o endurecido, se pueden adecuar para satisfacer las condiciones de la obra y los requisitos por medio de una selección apropiada de los materiales y de las proporciones de la mezcla. A excepción de la densidad, las propiedades físicas del hormigón de gran peso son similares a las del hormigón normal.

La resistencia es función de la relación agua/cemento; por lo tanto, para cualquier conjunto de materiales en particular, se pueden lograr resistencias comparables a las de los hormigones de peso normal (Herrera, 2008).

Las características de este hormigón deben permitir:

- La masa del hormigón fresco debe de ser trabajable.
- El hormigón endurecido debe poseer la resistencia y durabilidad deseada.
- El costo del producto resultante debe ser el mínimo compatible con calidad deseada.

Los requisitos para obtener el hormigón adecuado son:

- Usar materiales de calidad.
- Proporcionar y dosificar adecuadamente dichos materiales.
- Mezclar, transportar y colocar adecuadamente el concreto (para evitar segregación y lograr una buena compactación).
- Mantener las condiciones de curado adecuadas (para que la hidratación del cemento sea lo más completa posible).

Capítulo 3: Programa Experimental

3.1.- Metodología.

Basándose en la bibliografía obtenida, en el análisis de la información e investigaciones disponibles se desarrollará la siguiente metodología para el cumplimiento de los objetivos.

3.1.1.- 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

Etapa 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 minería, escorias de procesos de fundición de cobre. Se logró determinar el objetivo principal de la investigación y a su vez los objetivos secundarios.

Etapa II: Fase de formulación: Se presentan los antecedentes bibliográficos en torno al tema central de la investigación, específicamente respecto a la utilización de los áridos de escoria de cobre y sus características; además de las propiedades del hormigón

Etapa 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, Escorias de Cobre 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.

Etapa IV: Análisis y evaluación: Frente al trabajo en el laboratorio y una vez finalizados los ensayos correspondientes se procederá 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.

3.1.2.-Diagrama de Flujo.

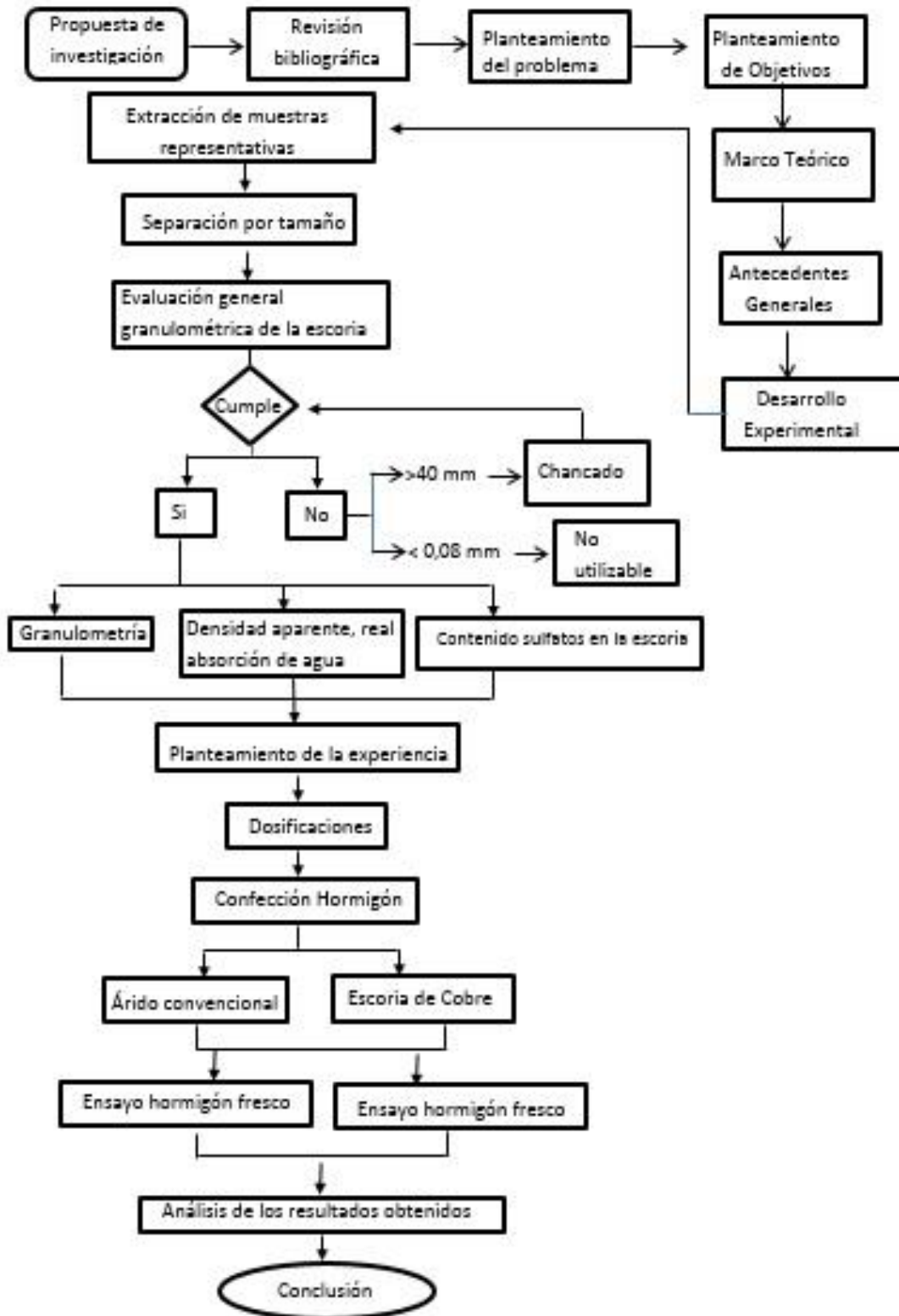


Figura 3. 1 Metodología de la investigación

3.1.3.- Diseño experimental

a.- 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 considerarán dos niveles de resistencia: 30 y 50 MPa. (grados H-30 y H-50).

Se confeccionarán 3 probetas por ensayo al cual se someterán, dando el siguiente desglose indicado en las tablas 3.1 y 3.2:

Tabla 3. 1 Resumen probetas a realizar con escoria de cobre.

Escoria de cobre			
Número probetas	Resistencia (Mpa.)	Edad hormigón (días)	Ensayo
3	30	28	Flexo-tracción
3	30	28	compresión
3	50	28	Flexo-tracción
3	50	28	compresión
Total probetas		12	

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla 3. 2 Resumen probetas a realizar con árido convencional.

Árido Convencional			
Número probetas	Resistencia (Mpa.)	Edad hormigón (días)	Ensayo
3	30	28	Flexo-tracción
3	30	28	compresión
3	50	28	Flexo-tracción
3	50	28	compresión
Total probetas		12	

(Fuente: Elaboración propia)

b.- Porcentaje de reemplazo de áridos.

Para el desarrollo de la investigación se plantea el uso de reemplazo total de áridos tanto fino como grueso y una mezcla patrón con áridos convencionales.

c.- 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.

d.- Tamaño máximo nominal del árido (D_n).

Este factor se considera según las condiciones del hormigón a fabricar. El tamaño máximo a utilizar estará dado por el tamiz de 40 mm

e.- Razón agua/ cemento.

La razón A/C se determinará de acuerdo al procedimiento 3 de la NCh 170 Of 85. Considerando una resistencia media requerida (f_r) de 30 y 50 MPa y grado del cemento corriente, determinándola según diversos factores:

- * Resistencia especificada
- * Nivel de confianza.
- * Condiciones para la fabricación de la mezcla.

f.- Edad del hormigón

El ensayo de resistencias a compresión y flexo-tracción se determinará según lo especificado en la NCh 170 Of 85 que considera la edad a los 28 días.

3.1.4.- Caracterización de áridos.

a.- Generalidades.

En la presente investigación se realizará la caracterización correspondiente, para determinar las propiedades que deben cumplir los áridos para la fabricación de hormigones, granulometría, densidad, absorción y contenido de finos.

Los áridos convencionales utilizados para esta investigación serán traídos de la planta de áridos BOCO.

También se utilizará escoria de fundición de cobre (EFC). Estos áridos deberán pasar por un proceso de molienda y selección para lograr obtener el árido requerido.

Los áridos se separarán según las siguientes series de tamices indicada en la tabla 3.3, separados tanto en árido grueso y árido fino.

Tabla 3. 3 Serie de tamices a utilizar en clasificación de áridos.

Serie de tamices para áridos		
Árido Grueso	40	20
	20	10
	10	5
Árido Fino	5	2,5
	2,5	1,25
	1,25	0,6
	0,6	0,3
	0,3	0,15
	0,15	0,08

(Fuente: NCh. 163, Of 2013.)

Todo el material dentro de las bandas granulométricas se acopiará y determinará el porcentaje de material utilizable sin ningún tipo de desgaste o molienda, el que no cumpla se procederá a pasar por proceso de molienda

b.- Normativa para la caracterización de los áridos.

Para los ensayos correspondientes a los áridos a emplear en la fabricación de hormigones se utilizarán 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 Of 2013. “Áridos para morteros y hormigones- Requisitos generales”
- * NCh 164 Of 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 1116 Of 1977. “Áridos para morteros y hormigones-Determinación de la densidad aparente”
- * 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 Of 2009. “Áridos para morteros y hormigones- Determinación de Las densidades real y neta y la absorción de agua para arena

3.1.5.- Preparación de las mezclas de hormigón.

Las mezclas serán 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.

3.1.6.- Probetas para las muestras de hormigón.

Probetas cúbicas de 20 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 tracción por flexión.

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

3.1.7.- Ensayos de resistencias mecánicas.

a.- Ensayo a compresión.

El procedimiento de ensayo se llevará a cabo de acuerdo a lo especificado a través de la Norma Chilena 1037.n 2009. “Ensayo a compresión de probetas cubicas y cilíndricas”.

El ensayo a rotura por compresión se realizará una vez terminado el periodo de curado a la edad determinada anteriormente (28 días).



Figura 3. 2 Probeta cúbica, sometida a pruebas de compresión.

(Fuente: Elaboración propia).

b.- Ensayo a tracción por flexión.

Este ensayo se desarrollará a través del procedimiento establecido en la Norma Chilena 1038.n 2009.

El ensayo se realizará luego del proceso de curado de las probetas a edad de 28 días.



Figura 3. 3 Probeta prismática, sometida a pruebas de tracción por flexión.

(Fuente: Elaboración propia).

3.1.8.- Sulfatos Solubles en agua.

Se determinará la cantidad de sulfatos solubles en agua según NCh1441/1. Of80 presente en la escoria de cobre.

3.2.- Tipo de Investigación.

La presente investigación será del tipo exploratoria, ya que busca visualizar el comportamiento y relación de las variables a estudiar. Además, el diseño de investigación es experimental, puesto que se desea comprobar la conducta de las variables por medio de experiencias en laboratorio.

3.3.- Extracción del material de escoria

Se procedió a extraer material de *Depósito de Escorias de Fundición Ventanas*. Se extrajeron un total de 3 muestras, cada una de 1 m³ aproximadamente. Fue necesario establecer los puntos exactos en los cuales se realizaron las extracciones de material, debido a que estas muestras deben reflejar con la mayor aproximación posible el material depositado, con esto se obtendrá una información apropiada sobre la homogeneidad del material de interés.

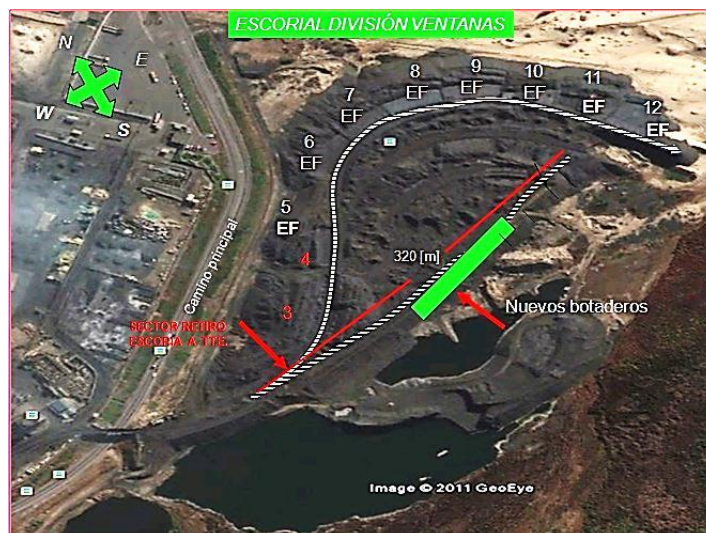


Figura 3. 4 Sectores de acopio y retiro de materiales en el depósito Fundición Ventanas.

(Fuente: Elaboración propia).

La figura 3.4 nos muestra la configuración interna que posee el depósito, pudiendo notar la zona de retiro de escoria hacia El Teniente y la zona de nuevos botaderos, además de las parcelas de acopio ordenadas por antigüedad, siendo la parcela número 3 la más antigua y la 12 la más nueva respectivamente. Esta antigüedad refiere al tiempo que lleva esa escoria en el depósito.

Teniendo en cuenta lo anterior se han establecido las zonas de retiro de material, buscando obtener muestras que podrían presentar las mayores diferencias una de otra, y con esto determinar si el depósito tiene escoria homogéneamente parecida en términos granulométricos.

La nomenclatura de las muestras es la siguiente:

Muestra 1: M1

Muestra 2: M2

Muestra 3: M3

La figura 3.5 nos muestra los sectores de donde se extrajo Escoria, se puede apreciar la disposición de acuerdo a la antigüedad de ésta en el depósito, siendo M1 la muestra de escoria más antigua, M3 la muestra de escoria más nueva, la cual está dispuesta en los nuevos botaderos, M2 son las muestras de escoria de antigüedad media. Según antigüedad las muestras se podrían escribir en la siguiente forma:

M1>M2>M3



Figura 3. 5 Zonas de extracción de muestras de escoria de cobre del depósito Fundición Ventanas.

(Fuente: Elaboración propia).

3.4.- Caracterización granulométrica de escoria

La granulometría es la determinación más corriente y una de las más importantes que se realiza a los áridos, y representa la distribución de los tamaños de partículas que poseen estos. Se realizó el procedimiento ejecutado de acuerdo a los requisitos y procedimientos establecidos por las normas chilenas siguientes:

- NCh163. Of. 2013 “Árido para morteros y hormigones - Requisitos generales”
- NCh164. Of. 2009 “Árido para morteros y hormigones - Extracción y preparación de muestras”.
- NCh165. Of. 2009 “Áridos para morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría”.

Cada una de las muestras fue sometida a una caracterización para determinar su homogeneidad en términos granulométricos. Para estos efectos se realizó un mezclado de la muestra, para luego efectuar un “cuarteo” de la misma, hasta obtener un peso aproximado de 32 kg, tamaño de muestra determinado según tabla 3.4; Se sugiere un peso de muestra mínimo según el tamaño máximo absoluto (Da) en mm que este posea, para esto se considera de forma a priori el material como grava y con un porcentaje de arena menor al 15%.

Se realizó una inspección visual al material y luego un tamizado de las partículas de mayor tamaño que se encontraron, con esto se determinó un tamaño máximo absoluto aproximado $D_a = 80\text{mm}$, correspondiente al D_a máximo especificado por la norma mencionada.

Tabla 3. 4 Tamaño de la muestra de ensayos de grava.

Tamaño máximo absoluto (D_a), mm	Masa mínima de la muestra kg
80	32
63	25
50	20
40	16
25	10
20	8
12,5	5
10	4

(Fuente: NCh165. Of 2009)

La tabla número 3.5 a continuación indica, el porcentaje de material fino ($D_a < 5\text{mm}$) y material grueso ($D_a \geq 5\text{mm}$) presentes en cada representación de las muestras extraídas, clasificados según la NCh 163.

Tabla 3. 5 Material grueso y fino de la escoria de cobre

Tamaño de árido	Muestra M1	Muestra M2	Muestra M3	Promedio	Dispersión	
	%	%	%	%	S	V,%
Total	100	100	100	100	X	X
Grueso	81	82	81	81	0,58	0,7
Fino	19	18	19	19	0,58	3,1

(Fuente: Elaboración propia)

Puede observarse en la tabla 3.5 que las tres muestras ensayadas son prácticamente iguales, lo que es ratificado por las bajas dispersiones obtenidas, de manera que puede inferirse que el depósito analizado es homogéneo en cuanto a granulometría.

3.5.- Ensayos de caracterización

3.5.1.- Ensayos a material grueso de Escoria de Cobre

a.- Granulometría

Procedimiento según NCh165. Of. 2009 “Áridos para morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría”.

Tabla 3. 6 Granulometría resumen grava escoria de cobre.

Granulometría Grava Escoria de Cobre				
Tamices		Porcentaje que pasa		
ASTM	NCh (mm)	Muestra (%)	Requisito NCh 163 (%)	
2"	50	100	100	100
1 1/2 "	37,5	96	90	100
3/4"	19	70	35	70
3/8	9,5	18	10	30
Nº4	4,75	0	0	5

(Fuente: Elaboración propia)

La figura 3.6 representa la curva granulométrica de la grava de escoria, la cual cumple con lo requerido por la norma NCh163. Of. 2013, en cuanto a la distribución de tamaños recomendada.

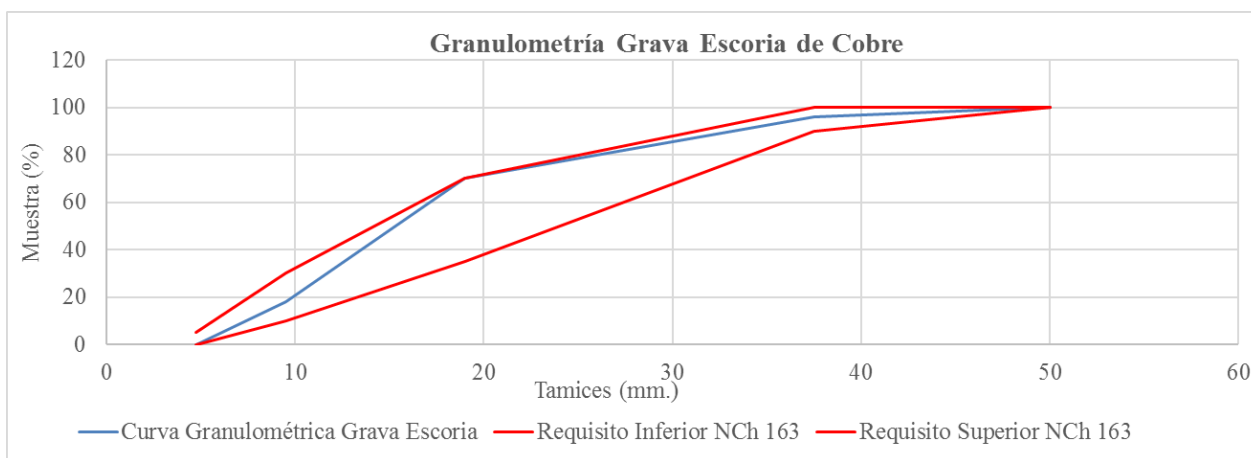


Figura 3. 6 Granulometría grava escoria de cobre.

(Fuente: Elaboración propia)

b.- Determinación de las densidades real y neta y absorción de agua de la grava escoria:

Para el procedimiento se utilizaron los parámetros entregados por la NCh1117 Of. 2010 Áridos para morteros y hormigones – “Determinación de las densidades real y neta de la absorción de agua de las gravas”.

c.- Determinación de la densidad aparente de la grava escoria

Para la densidad aparente se recurrió a la NCh1116. Of77 Áridos para morteros y hormigones – “Determinación de la densidad aparente”.

3.5.2.- Ensayos a material fino de Escoria de Cobre.

Se realizaron los ensayos anteriormente citados para el material grueso, con excepción de “Desgaste de los Ángeles” e incluyendo “Material menor que 0,080mm”.

a.- Granulometría

Procedimiento según NCh165. Of. 2009 “Áridos para morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría”.

Tabla 3. 7 Granulometría resumen arena escoria de cobre.

Arena Escoria de Cobre				
Tamices		Porcentaje que pasa (%)		
ASTM	NCh (mm)	Muestra (%)	Requisito NCh 163 (%)	
$\frac{3}{8}$ "	9,5	100	100	100
N°4	4,75	99	95	100
N°8	2,36	51	80	100
N°16	1,18	29	50	85
N°30	0,6	17	25	60
N°50	0,3	10	5	30
N°100	0,15	6	0	10

(Fuente: Elaboración Propia)

La figura 3.7 muestra claramente como la arena de escoria no cumple con lo requerido por la norma NCh163. Of. 2013, en cuanto a la distribución de tamaños recomendada. A pesar de esta situación, la norma dice que la arena aún sin cumplir con este requerimiento se puede utilizar siempre y cuando las muestras de prueba cumplan con los requisitos de las especificaciones particulares de la obra.

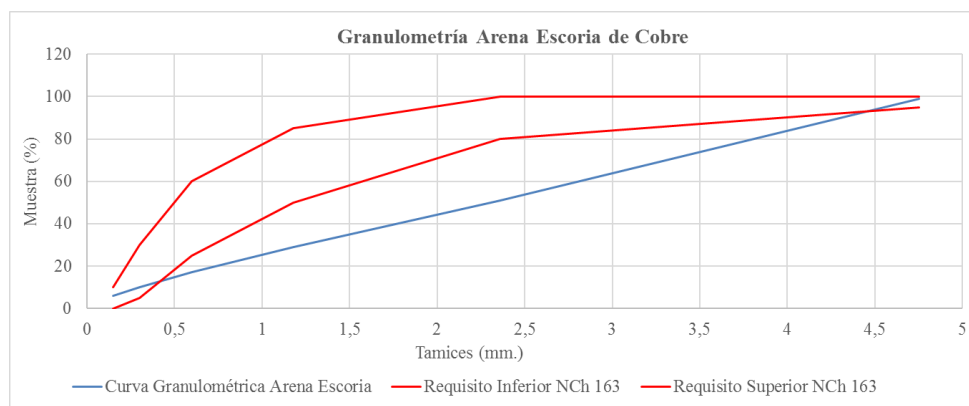


Figura 3. 7 Granulometría arena escoria de cobre.

(Fuente: Elaboración Propia)

b.- Material menor que 0,080mm presente en la arena de Escoria de Cobre:

Procedimiento según NCh1223. Of77. “Áridos para morteros y hormigones” - Determinación del material fino menor a 0,080 mm.

El material más fino que el tamiz 0,080 mm que posee un árido se conoce generalmente como arcilla; ésta recubre los granos de árido formando una película que desmejora la adherencia entre el árido y la pasta de cemento, lo cual afecta a la resistencia mecánica del mortero u hormigón.

El procedimiento se realizó de acuerdo a lo establecido en la norma NCh1223.Of77, consistió en determinar la masa inicial de una muestra de ensayo, separar el material fino mediante lavado y tamizado, y expresar la pérdida de material respecto a la masa inicial.

La tabla 3.11 nos muestra los resultados del ensayo y revela el contenido de finos inferiores a 0,080mm. Podemos inferir que la arena de escoria posee un contenido relativamente alto de este material, la norma Nch163. Of. 2013, nos dice que para un hormigón cualesquiera se debe considerar un límite del 5%, pero para un hormigón sometido a desgaste el máximo es de un 3%, por lo tanto un hormigón confeccionado con arena de

escoria de cobre estará dentro del límite aceptado por la norma si estamos en presencia de un hormigón sometido a desgaste.

Tabla 3. 8 Contenido de material fino menor a 0,080mm (%), presente en la arena de escoria de cobre.

MUESTRA	Material fino menor a 0,080mm (%)			
	<i>Peso de muestra seca</i>	<i>Peso muestra lavada y seca</i>	<i>Peso material fino inferior a 0,080mm</i>	<i>Contenido de material fino inferior a 0,080mm</i>
	g	g	g	%
1	851,2	808,5	42,7	5,0
2	862,1	823,7	38,4	4,5
3	858,5	817,8	40,7	4,7
PROMEDIO	857,3	816,7	40,6	4,7

(Fuente: Elaboración propia.)

c.- Determinación de las densidades real y neta y absorción de agua de la escoria de cobre:

Para la determinación de densidades real y neta además de absorción de agua se recurrió a la NCh1239.Of77 “Áridos para morteros y hormigones” – Determinación de las densidades real y neta de la absorción de agua de las arenas.

d.- Determinación de la densidad aparente de la escoria de cobre

Para la densidad aparente se recurrió a la NCh1116.Of77 Áridos para morteros y hormigones – “Determinación de la densidad aparente”.

Tabla 3. 9 Resumen de características físicas de la escoria.

CARACTERISTICA	ARENA	GRAVILLA
ρ NETA (Kg/m ³)	3944	3753
ρ REAL SECA (Kg/m ³)	3793	3740
ρ REAL SSS (Kg/m ³)	3831	3743
ρ Ap. SUELTA (Kg/m ³)	2251	2074
ρ . Ap. COMPACTADA (Kg/m ³)	2422	2193
% ABSORCIÓN	1,0	0,1

(Fuente: Elaboración propia)

La densidad neta de la Escoria de Cobre que nos muestra la tabla 3.9 está por encima de la densidad que nos indica la NCh 163 Of.2013 de un árido convencional que tiene un rango de 2000-3000 kg/m³

3.5.3.- Ensayos a material grueso de Árido Convencional.

a.- Granulometría.

Procedimiento según NCh165. Of. 2009 “Áridos para morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría”.

Tabla 3. 10 Granulometría resumen grava convencional.

Grava árido convencional				
Tamices		Porcentaje que pasa (%)		
ASTM	NCh (mm)	Muestra (%)	Requisito NCh 163 (%)	
1"	25	100	100	100
¾"	19	93	90	100
⅜"	9,5	17	20	55
Nº4	4,75	1	0	10

(Fuente: Elaboración Propia)

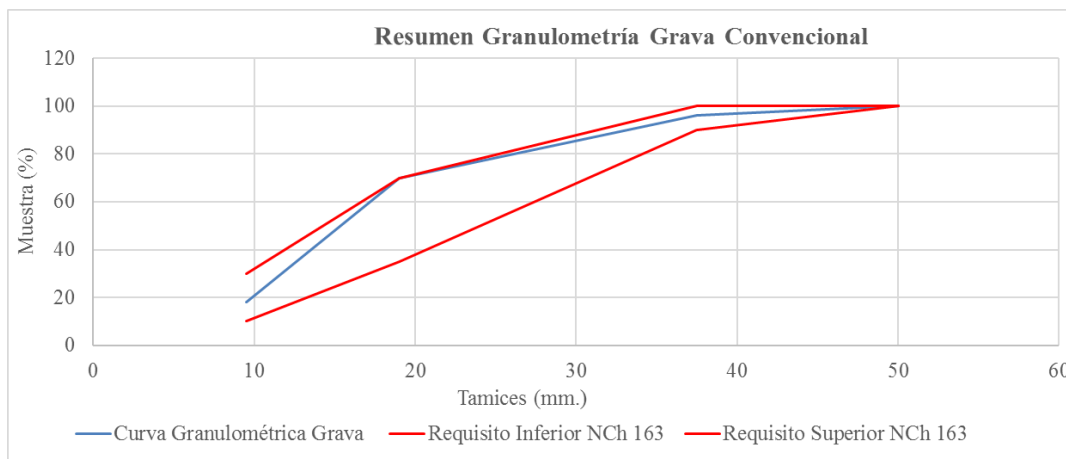


Figura 3. 8 Granulometría grava árido convencional.

(Fuente: Elaboración propia)

La figura 3.8 representa la curva granulométrica de la grava de árido convencional, la cual cumple con lo requerido por la norma NCh163. Of. 2013, a excepción del tamiz de 9,5 mm, en cuanto a la distribución de tamaños recomendada

b.- Determinación de las densidades real y neta y absorción de agua de la grava Árido convencional

Para el procedimiento se utilizaron los parámetros entregados por la NCh1117 Of. 2010 Áridos para morteros y hormigones – “Determinación de las densidades real y neta de la absorción de agua de las gravas”.

c.- Determinación de la densidad aparente de la grava árido convencional

Para la densidad aparente se recurrió a la NCh1116. Of77 Áridos para morteros y hormigones – “Determinación de la densidad aparente”.

3.5.4.- Ensayos a material fino de árido convencional

Se realizaron los ensayos anteriormente citados para el material grueso, con excepción de “Desgaste de los Ángeles” e incluyendo “Material menor que 0,080mm”.

a.- Granulometría

Procedimiento según NCh165. Of. 2009 “Áridos para morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría”.

Tabla 3. 11 Granulometría resumen arena árido convencional.

Arena árido convencional				
Tamices		Porcentaje que pasa (%)		
ASTM	NCh (mm)	Muestra (%)	Requisito NCh 163 (%)	
$\frac{3}{8}$ "	9,5	100	100	100
N°4	4,75	100	95	100
N°8	2,36	85	80	100
N°16	1,18	77	50	85
N°30	0,6	70	25	60
N°50	0,3	27	5	30
N°100	0,15	5	0	10

(Fuente: Elaboración Propia)

La figura 3.9 muestra como la arena en general cumple con lo requerido por la norma NCh163. Of. 2013.

Solamente se observa un incumplimiento en el tamiz ASTM N° 30 (0,6mm)

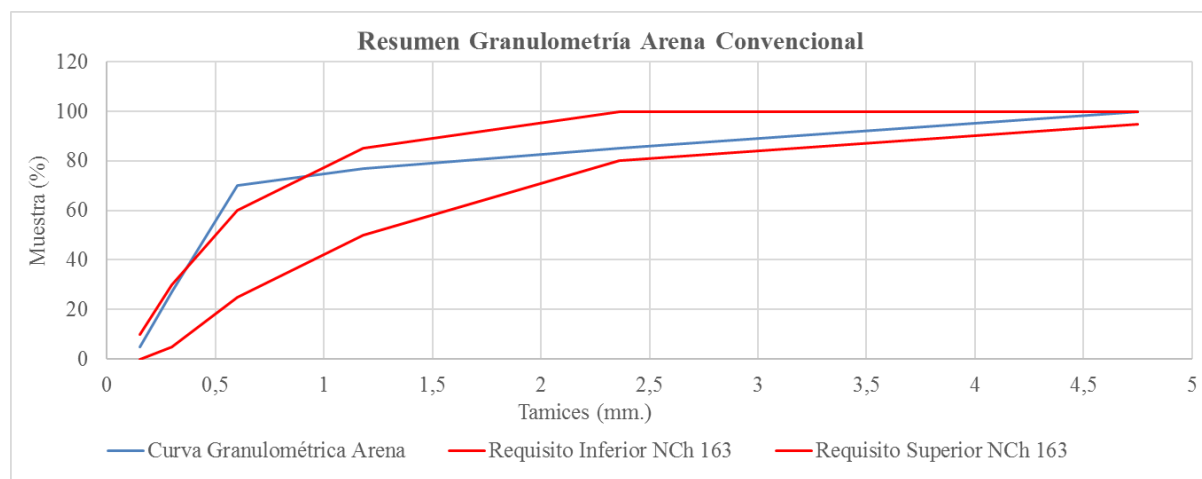


Figura 3. 9 Granulometría arena árido convencional.

(Fuente: Elaboración Propia)

b.- Determinación de las densidades real y neta y absorción de agua del árido convencional.

Para la determinación de densidades real y neta además de absorción de agua se recurrió a la NCh1239. Of.2009 “Áridos para morteros y hormigones” – Determinación de las densidades real y neta de la absorción de agua de las arenas.

c.- Determinación de la densidad aparente del árido convencional.

Para la densidad aparente se recurrió a la NCh1116.Of77 Áridos para morteros y hormigones – “Determinación de la densidad aparente”.

Tabla 3. 12 Resumen de características físicas del árido convencional.

CARACTERISTICA	ARENA	GRAVILLA
ρ NETA (Kg/m ³)	2698	2697
ρ REAL SECA (Kg/m ³)	2571	2631
ρ REAL SSS (Kg/m ³)	2618	2656
ρ Ap. SUELTA (Kg/m ³)	1539	1403
ρ . Ap. COMPACTADA (Kg/m ³)	1673	1490
% ABSORCIÓN	1,8	0,9

(Fuente: Elaboración Propia)

La tabla 3.12 muestra como las densidades netas del árido convencional se encuentra dentro de los rangos entregados por la NCh 163 Of. 2013 que fluctúan entre 2000 y 3000 kg/m³

3.6.- Dosificaciones

El diseño de los hormigones de la presente investigación se realizó con el método de dosificación propuesto por el IDIEM, junto a las consideraciones propuestas por la norma Chilena Nch170. Of. 85 – “Hormigón - Requisitos generales”.

3.6.1.- Dosificación H-30

a.- Dosificación H-30 Árido Convencional y Escoria de Cobre, por m³

Tabla 3. 13 Dosificación hormigón H-30

Dosificación H-30, por m³		
Materiales	Árido Convencional	Escoria de Cobre
	M³	M³
Cemento, Kg	407,00	407,00
Agua, Kg	172,00	172,00
Árido grueso, Kg	984,42	1.403,69
Árido fino,Kg	838,58	1.236,75

(Fuente: Elaboración Propia)

3.6.2.- Dosificación H-50

a.- Dosificación H-50 Árido Convencional y Escoria de Cobre, por m³

Tabla 3. 14 Dosificación hormigón H-50

Dosificación H-50, por m³		
Materiales	Árido Convencional	Escoria de Cobre
	M³	M³
Cemento, Kg	500,00	500,00
Agua, Kg	149,00	149,00
Árido grueso, Kg	945,54	1.348,25
Árido fino,Kg	805,46	1.187,90

(Fuente: Elaboración Propia)

Capítulo 4: Presentación 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, mencionadas anteriormente.

En primer lugar, se presentan 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 28 días. Posteriormente se presenta el análisis para los resultados a flexión-tracción a la edad de 28 días. Finalmente se presentan los resultados obtenidos de la densidad aparente de los distintos hormigones fabricados.

4.2.- Docilidad Hormigones.

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 las siguientes tablas.

4.2.1.- Asentamientos Hormigón H-30

Tabla 4. 1 Resumen asentamiento hormigón H-30

Asentamiento, cm	
Tipo de hormigón	Asentamiento
Árido Convencional	8
Escoria de Cobre	9

(Fuente: Elaboración Propia)

4.2.2.- Docilidad Hormigón H-50

Tabla 4. 2 Resumen asentamiento hormigón H-50.

Asentamiento, cm	
Tipo de hormigón	Asentamiento
Árido Convencional	6
Escoria de Cobre	7

(Fuente: Elaboración Propia)

Como puede observarse en la figura 4.1, los hormigones en los dos niveles de resistencia, confeccionados con escoria de cobre presentan un asentamiento levemente mayor que el de su par con arido convencional, esto atribuible al bajo porcentaje de absorción que presenta la escoria de cobre en comparación a un arido petreo convencional.

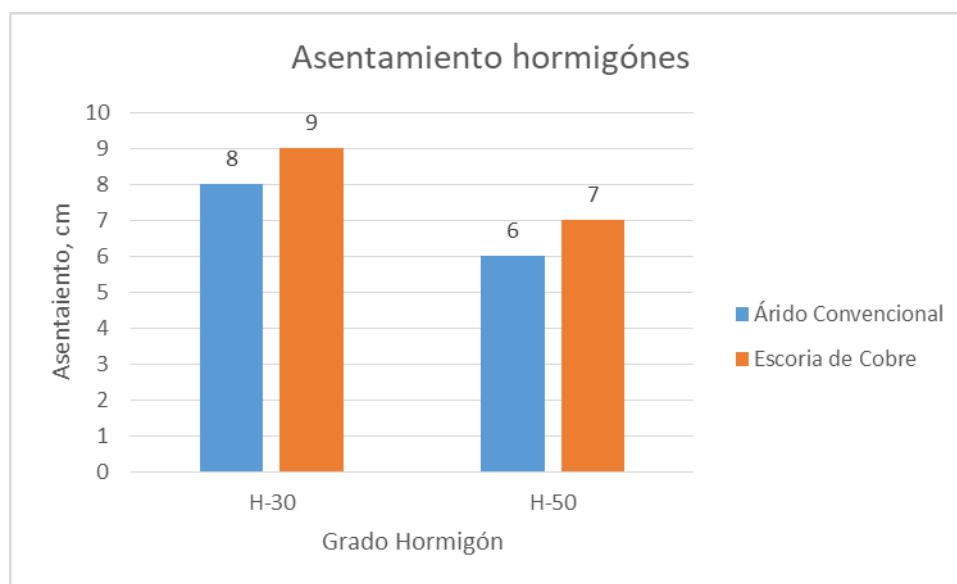


Figura 4. 1 Gráfica docilidad asentamientos hormigones

(Fuente: Elaboración Propia)

4.3.- Resultados resistencias a compresión

Los ensayos se realizaron de acuerdo al procedimiento establecido por la norma NCh 1037 Of 2009. Cada valor de resistencia corresponde al promedio de 3 probetas ensayadas a la edad de 28 días, los resultados individuales se presentan en Anexo.

4.3.1.- Resistencia promedio hormigones grado H 30

Tabla 4. 3 Resumen promedio hormigón H-30

Tipo de hormigón	Resistencia a compresión promedio	
	MPa	%
Con árido convencional	27,4	100
Con escoria de cobre	41,4	151

(Fuente: Elaboración Propia)

4.3.2 Resistencia promedio hormigones grado H 50

Tabla 4. 4 Resumen promedio hormigón H-50

Tipo de hormigón	Resistencia a compresión promedio	
	MPa	%
Con árido convencional	48,5	100
Con escoria de cobre	53,4	110

(Fuente: Elaboración Propia)

Puede observarse en las tablas 4.3 y 4.4 que, al emplear escoria como árido total, esta influye positivamente en la resistencia a compresión del hormigón. En los hormigones grado H 30 determinan un incremento del 51% en su resistencia respecto del hormigón patrón, fabricado con árido pétreos convencionales, sin embargo, en los hormigones grado H 50, el incremento logrado solo llega al 10%. En este último caso este menor incremento podría ser atribuido a la resistencia intrínseca de la escoria, que podría ser menor que la de los áridos pétreos.

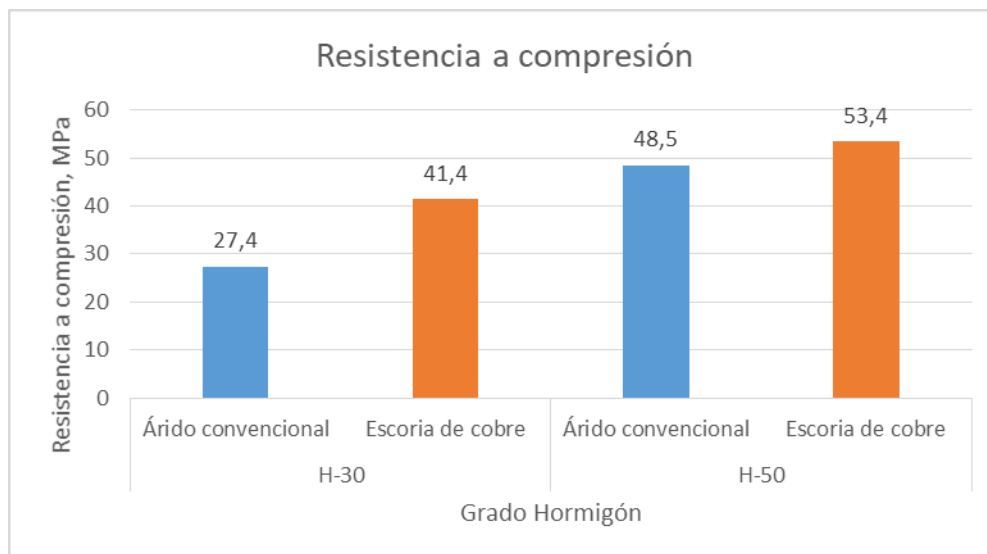


Figura 4. 2 Resistencia a compresión hormigones H-30

(Fuente: Elaboración Propia)

4.4.- Resultados resistencia a flexo-tracción.

Los ensayos se realizaron de acuerdo al procedimiento establecido por la norma NCh 1038. Of 2009. Cada valor de resistencia corresponde al promedio de 3 probetas ensayadas a la edad de 28 días, los resultados individuales se presentan en Anexo.

4.4.1.- Resistencia promedio hormigones grado H 30

Tabla 4. 5 Resistencia promedio hormigón H-30

Tipo de hormigón	Resistencia a flexotracción promedio	
	MPa	%
Con árido convencional	3,87	100
Con escoria de cobre	5,38	139

(Fuente: Elaboración Propia)

4.4.2.- Resistencia promedio hormigones grado H 50

Tabla 4. 6 Resistencia promedio hormigón H-50

Tipo de hormigón	Resistencia a flexotracción promedio	
	MPa	%
Con árido convencional	4,37	100
Con escoria de cobre	4,56	104

(Fuente: Elaboración Propia)

Se observa en las tablas 4.5 y 4.6 que la escoria empleada como árido total también influye positivamente en la resistencia a flexo-tracción del hormigón. En los hormigones H-30 verifica un aumento de 39 % respecto del hormigón fabricado con árido convencional, en los hormigones H 50 el incremento obtenido llega sólo al 4%.

En general los incrementos obtenidos en resistencia a flexo-tracción son menores que los obtenidos a compresión, lo que se debería a las texturas superficiales de la escoria de cobre son más lisas que la de los áridos, que son más rugosas, lo que favorecería una mayor adherencia con la pasta de cemento, por lo tanto, aumentando la resistencia a tracción.

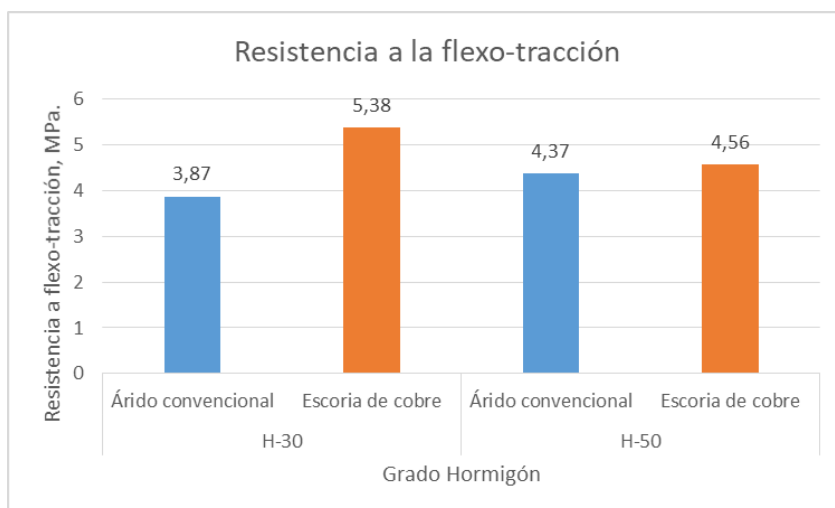


Figura 4. 3 Resistencia promedio a flexo- tracción

(Fuente: Elaboración Propia)

4.5.- Densidad aparente del hormigón.

A continuación se presentan los valores obtenidos del cálculo de densidades aparentes (pap) de las distintas muestras de hormigón.

Tabla 4. 7 Densidades aparentes hormigones grado H-30

Tipo de hormigón	Densidades aparentes (pap)	
	Kg/m ³	%
Con árido convencional	2.378	100
Con escoria de cobre	3.077	129

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 4. 8 Densidades aparentes hormigones grado H-50

Tipo de hormigón	Densidades aparentes (pap)	
	Kg/m ³	%
Con árido convencional	2.416	100
Con escoria de cobre	3.212	133

(Fuente: Elaboración Propia)

Se puede comprobar en las tablas 4,7 y 4.8 la influencia de la escoria de cobre sobre la densidad aparente del hormigón que, en términos generales, es del orden de un 30 % mayor comparado con la del hormigón hecho con árido convencional. Se observa que los hormigones H 50 presentan densidades aparentes ligeramente superiores que las de hormigón H 30 correspondiente, lo que se debería al mayor contenido de cemento de los primeros.

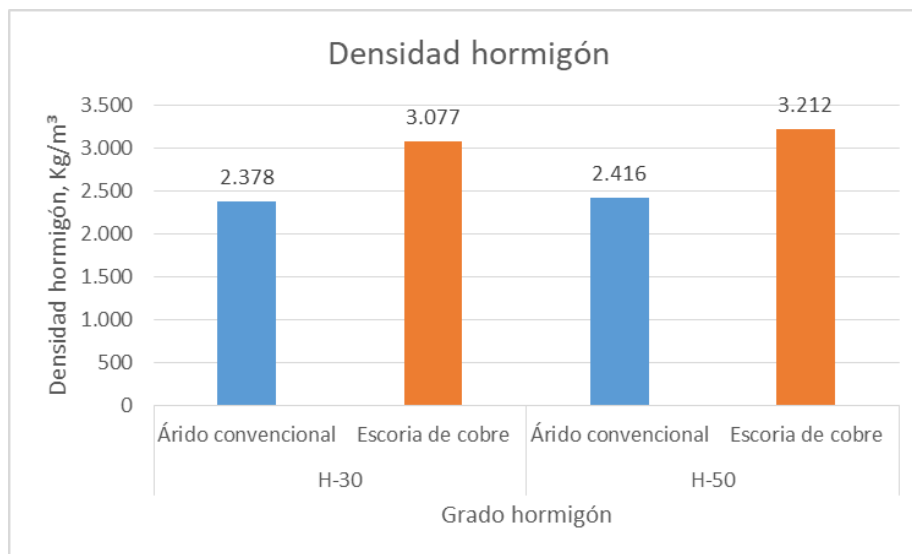


Figura 4. 4 Comparación de densidades hormigón

(Fuente: Elaboración Propia)

4.6.- Contenido de Sulfatos en la escoria

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la medición de sulfatos solubles en agua, de acuerdo al análisis químico cuyo contenido se incluye en el Anexo D.

Tabla 4. 9 Medición Sulfatos en referencia a la NCh 1444/1. Of 2010

Sulfatos solubles en agua		
Ensayo	Unidad	Medición laboratorio
SO ₄ ⁻²	Kg SO ₄ ⁻² / kg de escoria	78,9x10 ⁻⁶

(Fuente: Elaboración Propia)

Se observa en la tabla 4,9 que la presencia de ion sulfato soluble en agua según la medición establecida por la NCh 1444/1. Of 2010 alcanza $78,9 \times 10^{-6}$ Kg SO₄⁻² / kg de escoria. Considerando la menor dosis de cemento empleado, de 407 kg/m³ (hormigón H30) la cantidad de sulfatos sería de 0,14 Kg SO₄⁻² / m³ de escoria de cobre, mientras tanto la NCh 170 Of 2016 señala que el peso de ion sulfato solubles en agua no puede superar el 2% del peso del cemento utilizado en 1 m³ de hormigón, tomando el valor indicado en la tabla 3.13 correspondería a 407 kg de cemento por m³ (tomando valor más desfavorable de las dosificaciones), por lo tanto la presencia de sulfatos solubles en agua podría llegar hasta los

8,14 kg/m³, por lo cual la cantidad de sulfatos solubles en agua esta por debajo de lo establecido en la norma chilena.

Limite indicado por la NCh 170 Of 2016

2% peso cemento

2% * 407 (kg de cemento/m³ de hormigon)

8,14 kg de SO₄⁻²/ m³

Informe laboratorio NCh 1444/1 Of 2010 (Anexo D)

78,9x10⁻⁶ Kg SO₄⁻² / kg de escoria

0,0000789 Kg SO₄⁻² / kg de escoria

0,0000789 Kg SO₄⁻² / kg de escoria * 1781 kg de escoria/ m³ de hormigon

0,14 kg de SO₄⁻²/ m³

Capítulo 5: Conclusiones y proposiciones de futuras investigaciones.

5.1.- Conclusiones

En el presente capítulo se describen las conclusiones de mayor relevancia producto de la investigación, a partir del análisis de resultados.

Considerando los resultados obtenidos en esta experiencia, es posible inferir las siguientes conclusiones.

Se verifica que el depósito de escorias de la Fundición de Cobre Ventanas, ubicada en la localidad de Maitenes, comuna de Puchuncavi, es homogéneo en toda su extensión no obstante la diferencia de edad de los vertidos que lo han formado. En promedio, el depósito está constituido por 81% de partículas entre 40 mm y 5 mm y 19% de partículas menores que 5 mm.

Las características del material del depósito en general son satisfactorias y le permiten ser considerado como árido para hormigones. La granulometría de la fracción gruesa es compatible con los requisitos de la normalización chilena para gravas, la fracción fina es deficitaria en partículas. Las densidades, en general, son mayores que la de los áridos convencionales, en particular la densidad real, que sobrepasa los 3700 kg/m³. La absorción de estos áridos es muy baja y el contenido de finos menores que 0,080 mm. llega a un 4,7%.

Las resistencias mecánicas obtenidas en los hormigones fabricados con escoria muestran un significativo incremento respecto de los hormigones patrón. En compresión, para el nivel H 30 el incremento llega al 51% y para el nivel H 50, alcanza el 10%. En flexo tracción los incrementos son de 39 % y del 4 % para los niveles H 30 y H 50 respectivamente.

La densidad aparente de los hormigones que emplean escoria como árido total es considerablemente elevada, superando 3000 kg/m³: para el nivel H 30 llega a 3.077 kg/m³ y para el nivel H 50 alcanza a 3.212 kg/m³, valores promedio

Si bien la escoria presenta cierto contenido de sulfatos solubles en agua, el aporte de ion SO_4 al metro cubico de hormigón es despreciable, considerando los límites establecidos por la normalización chilena.

Como conclusión final es posible afirmar que las escorias de cobre del depósito Maitenes de la Fundición de Cobre Ventanas pueden ser empleadas como áridos para fabricar hormigones, por lo menos hasta nivel de resistencia grado H 50, para obras de construcción en general. Sin embargo, para edificación en altura, será necesario considerar su elevada densidad aparente.

5.2.- Futuras investigaciones

A continuación, se presentan algunas recomendaciones para posibles futuras investigaciones.

Realizar hormigones con diferentes niveles de resistencia, considerando un nivel intermedio al de la presente investigación con el fin de corroborar lo ya investigado.

Confeccionar probetas con reemplazo total de árido por Escoria de cobre y estudiar su retracción hidráulica, para poder determinar cómo se comportan los hormigones con EDC en el tiempo.

Determinar la resistencia intrínseca de la escoria de cobre del depósito Maitenes.

Referencias bibliográficas.

- Al-Jabri, K., Taha, R., & Al-Ghassani, M. (2002a). Use of copper slag and cement by-pass dust as cementitious materials. *Cement, concrete and aggregates*, 24(1), 7-12.
- Al-Jabri, K., Taha, R., & Al-Ghassani, M. (2002b). Use of copper slag and cement by-pass dust as cementitious materials. *Cement, concrete and aggregates*, 24(1), 7-12 %@ 0149-6123.
- Alves, H. P. d. F. (2007). Desigualdade ambiental no município de São Paulo: análise da exposição diferenciada de grupos sociais a situações de risco ambiental através do uso de metodologias de geoprocessamento. *Revista Brasileira de Estudos de População*, 24, 301-316.
- Baghabra, O. S., Maslehuddin, M., & Saadi, M. M. (1995). Effect of magnesium sulfate and sodium sulfate on the durability performance of plain and blended cements. *Materials Journal*, 92(1), 15-24.
- Bernal Camacho, J., Mahmoud Abdelkader, S., Reyes Pozo, E., & Moragues Terrades, A. (2013). Estudio de la influencia de los medios con presencia de sulfatos en hormigones con cementos sulforresistentes y adiciones minerales: Parte 1: Hormigones expuestos a sulfato sódico (Na_2SO_4). *Revista de la construcción*, 12(2), 14-29.
- Carmona Jiménez, J., & Jaimes Manosalva, M. (2015). Desigualdad ambiental y desigualdad comunicacional: Las portadas de El Mercurio de Valparaíso sobre el derrame de petróleo en la bahía de Quintero. *Cuadernos. info*(36), 71-87.
- Cendoya, P. (2009a). Efecto en la resistencia de las escorias de Fundición de cobre como agregado fino en el comportamiento resistente del hormigón. *Revista Chilena de Ingeniería*, 17.
- Cendoya, P. (2009b). Efecto en la resistencia de las escorias de fundición de cobre como agregado fino en el comportamiento resistente del hormigón. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 17(1), 85-94.
- Ebensperger. (2001). Fabricación y Uso Eficiente de Arenas Manufacturadas. *Bit, La revista tecnica de la ingeniería*, 22, 10-13.
- Ebensperger. (2003). Los Áridos en la Construcción. *Bit, La revista tecnica de la ingeniería*, 30, 26-32.
- Galvez, G. (2014). Prospección y Caracterización de las Escorias de Cobre del Depósito Fundición Ventanas. Estudio de Factibilidad para su empleo en Hormigones. Universidad de Valparaíso.

- Herrera, Y. (2008). *Hormigones alta densidad*. Universidad Politécnica de Catalunya,
- Lues, C. (2010). Los Áridos, Historia, clasificación, transformación, reciclado, maquinaria, tecnología y aplicaciones. In.
- Mahmoud Abdelkader, S. (2010). *Influencia de la composición de distintos hormigones en los mecanismos de transporte de iones agresivos procedentes de medios marinos*. Caminos,
- Mather, B. (1997). Discussion of “The Process of Sulfate Attack on Cement Mortars” by Shen Yang, Xu Zhongzi, and Tang Mingshu. *Advanced Cement Based Materials*, 5(3), 109-110.
- Mobasher, B., & Ariño, M. (1996). Effect of copper slag on the strength, and toughness of cementitious mixtures. *ACI Materials Journal*, 68-75.
- Molina, K. (2014). La Transnacionalización Minera en Chile.
- Moura, W., & Coutinho, D. (2004). Influence of copper slag admixture in concrete in durability properties. *Ambiente Construido. Porto Alegre*, 4(2), 41-56.
- Nazer, A., Pavez, O., & Toledo, I. (2013). Effect of type cement on the mechanical strength of copper slag mortars. *Rem: Revista Escola de Minas*, 66, 85-90.
- Neville, A. (2004). The confused world of sulfate attack on concrete. *Cement and Concrete research*, 34(8), 1275-1296.
- Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete* (Vol. 4): Longman London.
- Orizola, S. (2006). *USO DE ESCORIA DE COBRE EN CEMENTOS*. UNIVERSIDAD DE CHILE, Retrieved from http://www.thesis.uchile.cl/tesis/uchile/2006/orizola_s/sources/orizola_s.pdf
- Sepúlveda , C. A. (2006). Utilización de Escorias de Fundición para la Producción de Compuestos de Hierro.
- Sotomayor, L. (2009). *GUIA DE CONDICIONES MEDIOAMBIENTALES A CONSIDERAR PARA EL DISEÑO DE UNA PLANTA DE EXTRACCIÓN Y PROCESAMIENTO DE ÁRIDOS* Universidad Austral de Chile, Retrieved from <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2009/bmficis7181g/doc/bmficis7181g.pdf>
- Sánchez, M., Parada, F., Parra, R., Marquez, F., Jara, R., Carrasco, J., & Palacios, J. (2004). *Management of copper pyrometallurgical slags: giving additional value to copper mining industry*. Paper presented at the VII Int. Conference on Molten Slags, Fluxes & Salts, Cape Town, South Africa.

Anexos.**Anexo A.- Granulometría****A.1.- Granulometría Árido convencional.****A.1.1.- Gravilla:****Tabla A.1: Granulometría Muestra N° 1 de gravilla Árido convencional.**

Gravilla A.C (Muestra 1)					
TAMIZ		PESO RETENIDO	% RETENIDO		%
ASTM	TAMIZ (mm) - NCH163 OF 2013	gramos	PARCIAL	ACUMULADO	QUE PASA
2"	50	0	0	0	100
1,5	37,5	0,0	0	0	100
1	25	78,3	1	1	99
3/4	19	440,4	5	6	94
3/8	9,5	6997,2	76	81	19
4	4,75	1669,5	18	99	1
BAJO 4		66,6	1	100	0
MASA REAL		9252			
MASA INICIAL		9257			
ERROR		0,05%			

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla A.2: Granulometría Muestra N° 2 de gravilla Árido convencional.

Gravilla A.C (Muestra 2)					
TAMIZ		PESO RETENIDO	% RETENIDO		%
ASTM	TAMIZ (mm) - NCH163 OF 2013	gramos	PARCIAL	ACUMULADO	QUE PASA
2"	50	0	0	0	100
1,5	37,5	0,0	0	0	100
1	25	0,0	0	0	100
3/4	19	602,0	6	6	94
3/8	9,5	7856,8	79	85	15
4	4,75	1420,8	14	100	0
BAJO 4		28,8	0	100	0
MASA REAL		9908			
MASA INICIAL		9947			
ERROR		0,39%			

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla A.3: Granulometría Muestra N° 3 de gravilla Árido convencional.

Gravilla A.C (granulometria 3)					
TAMIZ		PESO RETENIDO	% RETENIDO		%
ASTM	TAMIZ (mm) - NCH163 OF 2013	gramos	PARCIAL	ACUMULADO	QUE PASA
2"	50	0	0	0	100
1,5	37,5	0,0	0	0	100
1	25	0,0	0	0	100
3/4	19	894,8	9	9	91
3/8	9,5	7149,2	74	83	17
4	4,75	1572,4	16	99	1
BAJO 4		53,0	1	100	0
MASA REAL		9669			
MASA INICIAL		9680			
ERROR		0,11%			

(Fuente: Elaboración Propia)

A.1.2.- Arena:**Tabla A.4: Granulometría Muestra N° 1 de arena Árido convencional.**

Arena A.C. (Muestra 1)					
TAMIZ		PESO RETENIDO	% RETENIDO		%
ASTM	TAMIZ (mm) - NCH163 OF 2013	gramos	PARCIAL	ACUMULAD O	QUE PASA
3/8	9,5	0	0	0	100
4	4,75	65,0	9	9	91
8	2,36	94,9	14	23	77
16	1,18	50,3	7	30	70
30	0,6	41,4	6	36	64
50	0,3	271,1	39	76	24
100	0,15	131,3	19	95	5
BAJO 100		38,0	5	100	0
MASA REAL		692			
MASA INICIAL		695			
ERROR		0,37%			

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla A.5: Granulometría Muestra N° 2 de arena Árido convencional.

Arena A.C. (Muestra 2)					
TAMIZ		PESO RETENIDO	% RETENIDO		%
ASTM	TAMIZ (mm) - NCH163 OF 2013	gramos	PARCIAL	ACUMULAD O	QUE PASA
3/8	9,5		0	0	100
4	4,75	59,5	9	9	91
8	2,36	90,2	14	23	77
16	1,18	44,5	7	30	70
30	0,6	37,5	6	36	64
50	0,3	244,5	38	74	26
100	0,15	134,7	21	95	5
BAJO 100		32,0	5	100	0
MASA REAL		643			
MASA INICIAL		646			
ERROR		0,43%			

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla A.6: Granulometría Muestra N° 3 de arena Árido convencional.

Arena A.C. (Muestra 3)					
TAMIZ		PESO RETENIDO	% RETENIDO		%
ASTM	TAMIZ (mm) - NCH163 OF 2013	gramos	PARCIAL	ACUMULAD O	QUE PASA
3/8	9,5	0	0	0	100
4	4,75	64,6	9	9	91
8	2,36	93,9	14	23	77
16	1,18	46,6	7	30	70
30	0,6	43,4	6	36	64
50	0,3	266,7	39	75	25
100	0,15	137,4	20	95	5
BAJO 100		34,6	5	100	0
MASA REAL		687			
MASA INICIAL		689			
ERROR		0,22%			

(Fuente: Elaboración Propia)

A.2.- Granulometría Escoria de Cobre.

A.2.1.- Gravilla

Tabla A.7: Granulometría Muestra N° 1 de gravilla Escoria de Cobre.

Gravilla E.D.C (Muestra 1)					
TAMIZ		PESO RETENIDO	% RETENIDO		%
ASTM	TAMIZ (mm) - NCH163 OF 2013	gramos	PARCIAL	ACUMULADO	QUE PASA
2"	50	0	0	0	100
1,5	37,5	394,8	0	0	100
1	25	292,8	1	1	99
3/4	19	1274,4	5	6	94
3/8	9,5	5038,8	76	81	19
4	4,75	1543,2	18	99	1
BAJO 4			1	100	0
MASA REAL		8544			
MASA INICIAL		8556			
ERROR		0,14%			

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla A.8: Granulometría Muestra N° 2 de gravilla Escoria de Cobre.

Gravilla E.D.C (Muestra 2)					
TAMIZ		PESO RETENIDO	% RETENIDO		%
ASTM	TAMIZ (mm) - NCH163 OF 2013	gramos	PARCIAL	ACUMULADO	QUE PASA
2"	50	0	0	0	100
1,5	37,5	280,0	0	0	100
1	25	1348,0	0	0	100
3/4	19	1179,0	6	6	94
3/8	9,5	5062,0	79	85	15
4	4,75	1872,0	14	100	0
BAJO 4			0	100	0
MASA REAL		9741			
MASA INICIAL		9761			
ERROR		0,20%			

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla A.9: Granulometría Muestra N° 3 de gravilla Escoria de Cobre.

Gravilla E.D.C (granulometria 3)					
TAMIZ		PESO RETENIDO	% RETENIDO		%
ASTM	TAMIZ (mm) - NCH163 OF 2013	gramos	PARCIAL	ACUMULADO	QUE PASA
2"	50	0	0	0	100
1,5	37,5	306,5	0	0	100
1	25	1639,6	0	0	100
3/4	19	1345,2	9	9	91
3/8	9,5	3586,3	74	83	17
4	4,75	1547,9	16	99	1
BAJO 4			1	100	0
MASA REAL		8426			
MASA INICIAL		8457			
ERROR		0,38%			

(Fuente: Elaboración Propia)

A.2.2.- Arena**Tabla A.10: Granulometría Muestra N° 1 de arena Escoria de Cobre.**

Arena A.C. (Muestra 1)					
TAMIZ		PESO RETENIDO	% RETENIDO		%
ASTM	TAMIZ (mm) - NCH163 OF 2013	gramos	PARCIAL	ACUMULAD O	QUE PASA
3/8	9,5	0	0	0	100
4	4,75	11,1	9	9	91
8	2,36	362,9	14	23	77
16	1,18	176,1	7	30	70
30	0,6	91,6	6	36	64
50	0,3	57,9	39	76	24
100	0,15	36,3	19	95	5
BAJO 100		48,5	5	100	0
MASA REAL		784			
MASA INICIAL		785			
ERROR		0,08%			

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla A.11: Granulometría Muestra No 2 de arena Escoria de Cobre.

Arena A.C. (Muestra 2)					
TAMIZ		PESO RETENIDO	% RETENIDO		%
ASTM	TAMIZ (mm) - NCH163 OF 2013	gramos	PARCIAL	ACUMULAD O	QUE PASA
3/8	9,5	0	0	0	100
4	4,75	0,0	9	9	91
8	2,36	488,9	14	23	77
16	1,18	223,9	7	30	70
30	0,6	117,6	6	36	64
50	0,3	92,7	38	74	26
100	0,15	53,9	21	95	5
BAJO 100		66,1	5	100	0
MASA REAL		1043			
MASA INICIAL		1044			
ERROR		0,10%			

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla A.12: Granulometría Muestra No 3 de arena Escoria de Cobre.

Arena A.C. (Muestra 3)					
TAMIZ		PESO RETENIDO	% RETENIDO		%
ASTM	TAMIZ (mm) - NCH163 OF 2013	gramos	PARCIAL	ACUMULAD O	QUE PASA
3/8	9,5	0	0	0	100
4	4,75	9,0	9	9	91
8	2,36	340,8	14	23	77
16	1,18	163,1	7	30	70
30	0,6	75,9	6	36	64
50	0,3	35,4	39	75	25
100	0,15	19,3	20	95	5
BAJO 100		24,2	5	100	0
MASA REAL		668			
MASA INICIAL		669			
ERROR		0,24%			

(Fuente: Elaboración Propia)

Anexo B

B.1 Resistencia a la compresión.

B.1.1 Resistencia a la compresión hormigón h-30

Tabla B.1: Resistencia a la compresión hormigón con árido convencional

Compresión (cubos 20x20)	
Árido Convencional	
N probeta	Resistencia máxima (MPa.)
1	27,2
2	27,0
3	28,1
Promedio	27,4

(Fuente: Elaboración Propia)

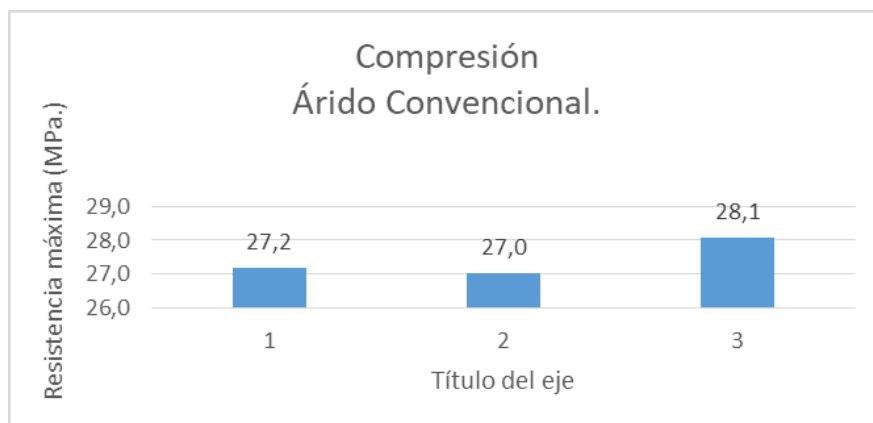


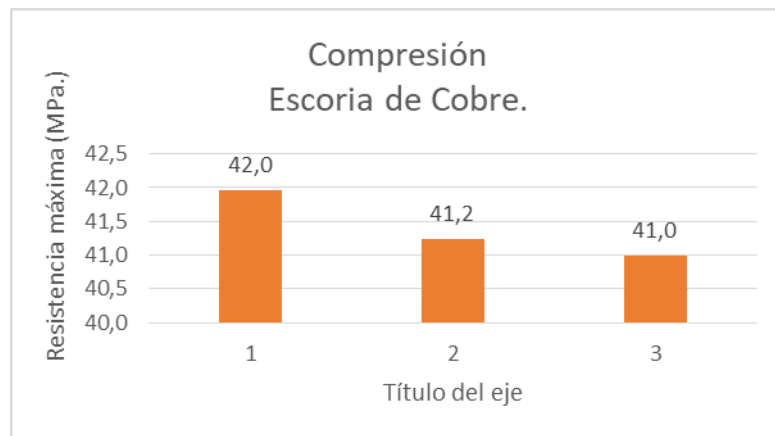
Figura B.1: Grafica compresión hormigón H-30 Árido Convencional.

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla B.2: Resistencia a la compresión hormigón con Escoria de Cobre

Compresión (cubos 20x20)	
Escoria de Cobre	
N probeta	Resistencia máxima (MPa.)
1	42,0
2	41,2
3	41,0
Promedio	41,4

(Fuente: Elaboración Propia)

**Figura B.2: Grafica compresión hormigón H-30 Escoria de Cobre.**

(Fuente: Elaboración Propia)

B.1.2 Resistencia a la compresión hormigón h-50

Tabla B.3: Resistencia a la compresión hormigón con árido convencional

Compresión (cubos 20x20)	
Árido Convencional	
N probeta	Resistencia máxima (MPa.)
1	48,5
2	48,7
3	48,2
Promedio	48,5

(Fuente: Elaboración Propia)

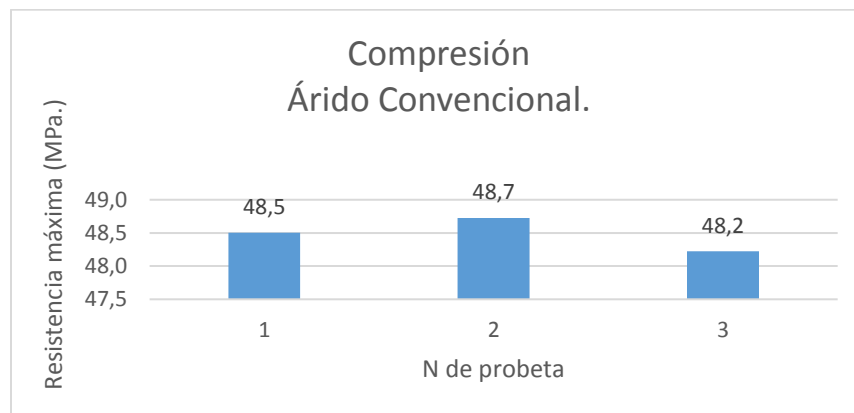


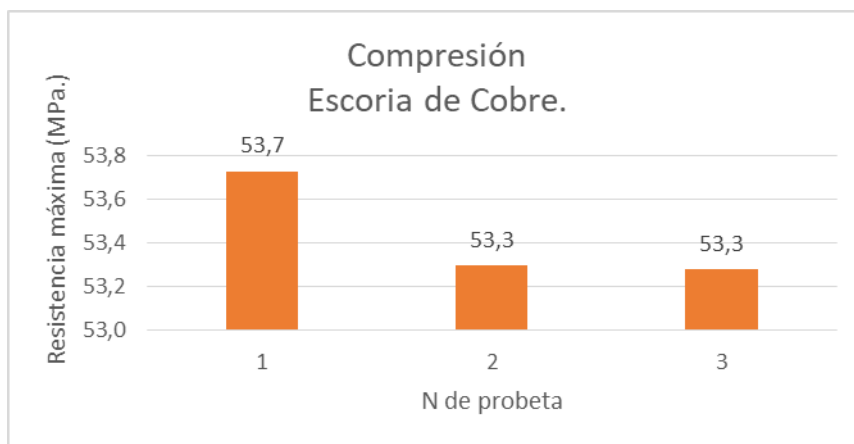
Figura B.3: Grafica compresión hormigón con Árido Convencional.

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla B.4: Resumen compresión hormigón H-50 Escoria de Cobre.

Compresión (cubos 20x20)	
Escoria de Cobre	
N probeta	Resistencia máxima (MPa.)
1	53,7
2	53,3
3	53,3
Promedio	53,4

(Fuente: Elaboración Propia)

**Figura B.1: Grafica compresión hormigón H-50 Escoria de Cobre.**

(Fuente: Elaboración Propia)

B.2 Resistencia a la Flexo-Tracción

B.2.1 Resistencia a la Flexo-Tracción hormigón h-30

Tabla B.5: Tracción por flexión hormigón H-30 con Árido Convencional.

Flexo-Tracción (vigas 15x15x55)	
Árido Convencional	
N probeta	Resistencia máxima (MPa.)
1	3,79
2	3,94
3	3,89
Promedio	3,87

(Fuente: Elaboración Propia)

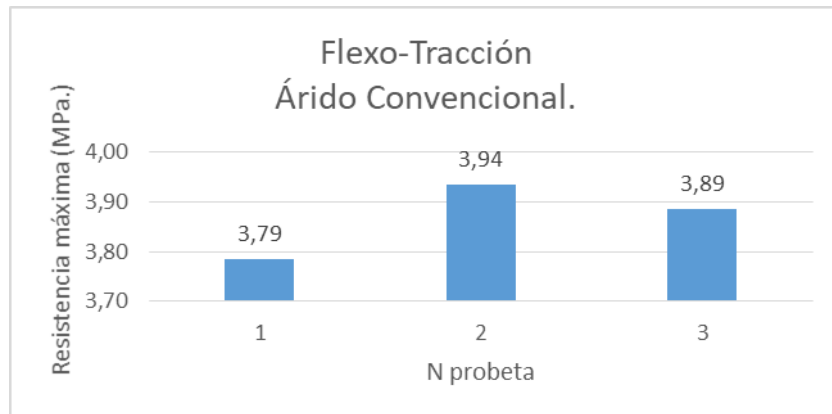


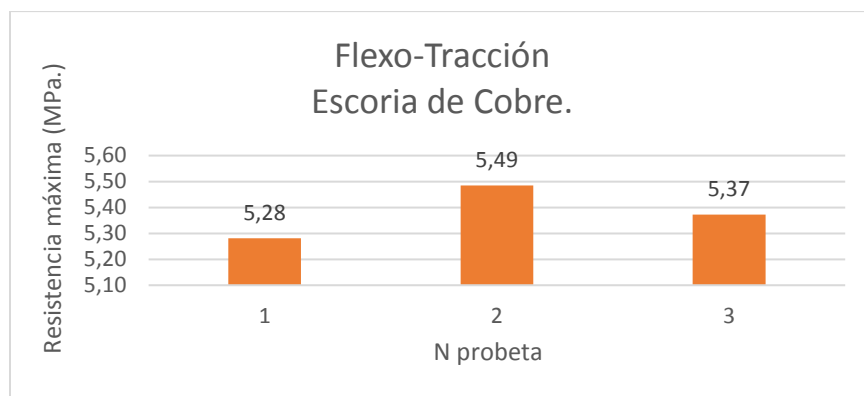
Figura B.2: Grafica tracción por flexión hormigón H-30 Árido Convencional.

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla B.13: Resumen tracción por flexión hormigón H-30 Escoria de Cobre.

Flexo-Tracción (vigas 15x15x55)	
Escoria de Cobre	
N probeta	Resistencia máxima (MPa.)
4	5,28
5	5,49
6	5,37
Promedio	5,38

(Fuente: Elaboración Propia)

**Figura B.3: Grafica tracción por flexión hormigón H-30 Escoria de Cobre.**

(Fuente: Elaboración Propia)

B.2.2 Resistencia a la Flexo-Tracción hormigón H-50

Tabla B.8: Tracción por flexión hormigón H-50 con Árido Convencional.

Flexo-Tracción (vigas 15x15x55)	
Árido Convencional	
N probeta	Resistencia máxima (MPa.)
1	4,26
2	4,52
3	4,34
Promedio	4,37

(Fuente: Elaboración Propia)

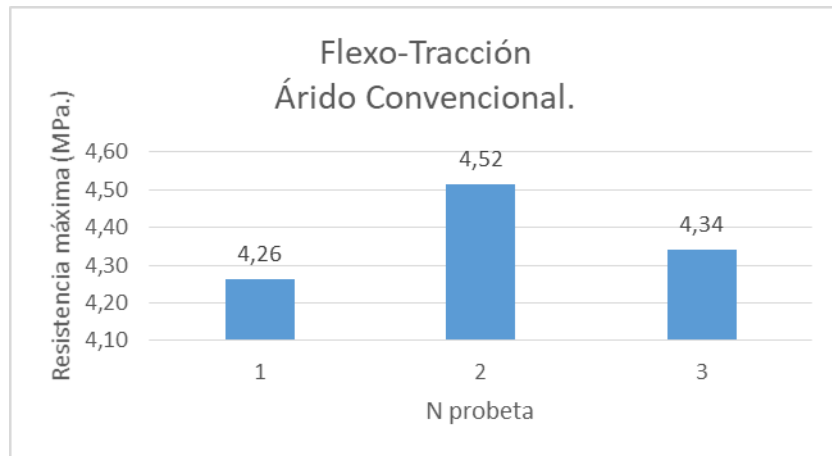


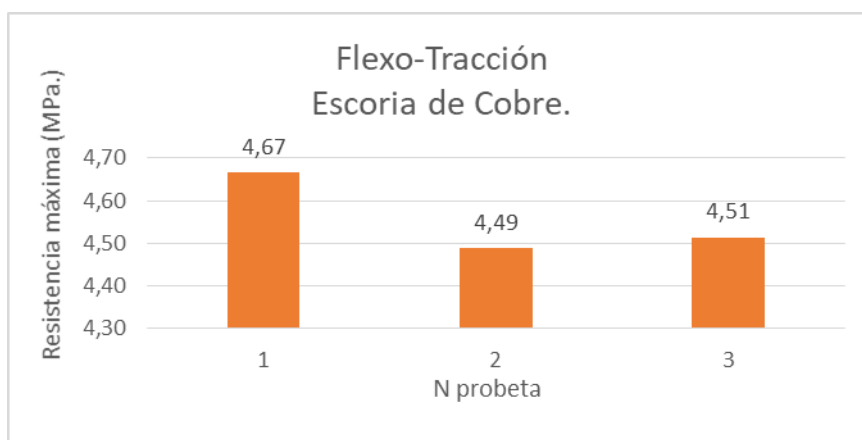
Figura B.8: Grafica tracción por flexión hormigón H-50 Árido Convencional.

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla B.9: Resumen tracción por flexión hormigón H-50 Escoria de Cobre.

Flexo-Tracción (vigas 15x15x55)	
Escoria de Cobre	
N probeta	Resistencia máxima (MPa.)
4	4,67
5	4,49
6	4,51
Promedio	4,56

(Fuente: Elaboración Propia)

**Figura B.9: Grafica tracción por flexión hormigón H-50 Escoria de Cobre.**

(Fuente: Elaboración Propia)

Anexo C

C.1.- Densidad Aparente.

C.1.1.- Densidad aparente hormigón H-30.

Tabla C.1: Densidad aparente hormigón H-30 Árido Convencional.

Peso Árido Convencional		
N probeta	probeta (kg)	M3 (Kg)
1	19,10	2.387,26
2	19,06	2.382,52
3	18,91	2.363,85
Promedio	19,02	2.377,88

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla C.2: Densidad hormigón H-30 Escoria de Cobre.

Peso Escoria de Cobre		
N probeta	Probeta (Kg)	M3 (Kg)
1	25,00	3.125,33
2	24,47	3.059,26
3	24,37	3.046,81
Promedio	24,62	3.077,14

(Fuente: Elaboración Propia)

C.1.2.- Densidad aparente hormigón H-50.

Tabla C.3: Densidad aparente hormigón H-50 Árido Convencional.

N probeta	Peso Árido Convencional	
	probeta (kg)	M3 (Kg)
1	19,41	2.425,78
2	19,29	2.410,67
3	19,29	2.410,67
Promedio	19,33	2.415,70

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla C.4: Densidad hormigón H-50 Escoria de Cobre.

N probeta	Peso Escoria de Cobre	
	Probeta (Kg)	M3 (Kg)
1	25,39	3.174,22
2	26,05	3.256,00
3	25,65	3.205,63
Promedio	25,70	3.211,95

(Fuente: Elaboración Propia)

Anexo D

D.1.- Generalidades dosificación

A continuación, se explica el procedimiento de dosificación, según el método del Profesor Juan Egaña, para los dos niveles de resistencia H-30 y H-50

D.2.- Resistencia media Requerida

Resistencia media requerida ($f_r = f_c + t \times s$), para poder desarrollar dicha formula se comienza con las siguientes condiciones;

t = Nivel de confianza, dado por la tabla D.1.

Tabla E.1. Nivel de Confianza

Nivel de confianza	t
80%	0,842
85%	
90%	1,282
95%	1,645

(Fuente: Metodo dosificacion profesor Juan Egaña)

s = Dispersión estimada de resistencias, dada por la tabla D.2

Tabla D.2. dispersión estimada de resistencias

Condiciones previstas para ejecucion en obra	S estimada, Mpa $f_c \leq H15$	S estimada, Mpa $f_c \geq 15$
Regulares	8,0	
Medias	6,0	7,0
Buenas	4,0	5,0
Muy Buenas	3,0	4,0

(Fuente: Metodo dosificacion profesor Juan Egaña)

Nota. Para el caso de hormigones premezclados, normalmente se emplea $S = 3,5$ MPa, tomando esta consideración para determinar el valor de S

Fr= Resistencia media requerida

Fr H-30

$$fr = fc + t \times s$$

$$fr = 300 \text{ (kg/cm}^2\text{)} + 1,282 \times 35 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$fr = 300 \text{ (kg/cm}^2\text{)} + 44,87 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$fr = 344,87 \text{ (kg/cm}^2\text{)} \approx 345 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Fr H-50

$$fr = fc + t \times s$$

$$fr = 500 \text{ (kg/cm}^2\text{)} + 1,282 \times 35 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$fr = 500 \text{ (kg/cm}^2\text{)} + 44,87 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$fr = 544,87 \text{ (kg/cm}^2\text{)} \approx 545 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

D.3.- Dosis de Cemento

Se continúa calculando la dosis de cemento necesaria tanto para H-30 y H-50 se obtiene por interpolación de la siguiente tabla

Tabla D.3. Dosis de cemento estimado por m³ de hormigón

fr (kgf/cm ²)	Dosis cemento estimada,	
	Corriente	Alta resistencia
80	170	140
100	190	155
120	210	175
140	235	195
160	260	215
180	285	235
200	305	250
220	325	270
240	345	285
260	355	295
280	370	305
300	380	315
320	395	325
340	405	335
360	415	345
380	430	355
400	440	365
420	450	370
440	455	375
460	460	380
480	465	385
500	470	390
520	480	400

(Fuente: Metodo dosificacion profesor Juan Egaña)

En el caso de H-30 (fr=345) se obtiene de la interpolación de los valores señalados en la tabla D.3, obteniendo una dosis de cemento corriente de 407 (kg/m³), en el caso de hormigón H-50 (fr=545) la resistencia se encuentra por sobre de la tabla señalada, pero se tomará un valor de cemento corriente de 500 (kg/m³),

D.4.- Estimación de la dosis de agua de amasado en función de la dosis de cemento y del tamaño máximo nominal Dn del árido

Para determinar el agua de amasado se obtiene de la interpolación de la tabla D.4

Tabla D.4. Agua de amasado por m³ de hormigón

dosis de cemento, (kg/m ³)	Agua de amasado , (kg/m ³)	
	Dn 40 mm	Dn 20 mm
170	154	160
200	160	165
230	167	175
260	176	184
290	182	190
310	186	192
340	182	190
370	180	188
400	174	184
430	170	178
460	160	168
490	152	160
520	145	152
550	140	145

(Fuente: Metodo dosificacion profesor Juan Egaña)

En el caso de H-30 se determinó la cantidad de 172 (kg/m³) de agua de amasado y para H-50 de 149 (kg/m³),

D.5.- Determinación del peso del m³ de hormigón

Tabla D.5. Estimación del peso de un metro cúbico de hormigón fresco compactado

Tipo de homirgon	Tamaño máximo del árido (mm)	Peso estimado del hormigón (kg/m ³)
Simple, cemento ≤ 200 (kg/m ³)	40 - 50	2300
Simple, cemento > 200 (kg/m ³)	40 - 50	2400
Aceras	20	2420
Armado en General	40 - 50	2450
Armado en General	10 -20	2430
calzadas	40	2450

(Fuente: Metodo dosificacion profesor Juan Egaña)

De la tabla D.5 se obtiene el peso estimado del m³ de hormigón, el cual es 2400 kg/m³, para ambos tipos de hormigón se toma el mismo valor de referencia ya que no hace diferencias

H-30

$$C + A = 407 \text{ (kg/m}^3\text{)} + 170 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$577 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$\text{Relación } A/C = 170/407 = 0,42$$

$$\text{Peso del árido} = M^3 \text{ Hormigón (kg/m}^3\text{)} - \text{agua (kg/m}^3\text{)} - \text{cemento } 407 \text{ (kg/m}^3\text{)} = 1823$$

$$2400 \text{ (kg/m}^3\text{)} - 170 \text{ (kg/m}^3\text{)} - 407 \text{ (kg/m}^3\text{)} = 1823 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$\text{Peso Arena} = \text{Peso del Árido} \times A.C$$

$$1823 \text{ (kg/m}^3\text{)} \times 0,46 = 838, 58$$

$$\text{Peso Grava} = \text{Peso del Árido} \times A.C$$

$$1823 \text{ (kg/m}^3\text{)} \times 0,54 = 984,42$$

H-50

$$\begin{aligned} \mathbf{C + A} &= 500 \text{ (kg/m}^3\text{)} + 149 \text{ (kg/m}^3\text{)} \\ &649 \text{ (kg/m}^3\text{)} \end{aligned}$$

$$\mathbf{Relaci3n A/C} = 149/500 = 0,30$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Peso \text{ del } \acute{a}rido} &= \text{M}^3 \text{ Hormig3n (kg/m}^3\text{)} - \text{agua (kg/m}^3\text{)} - \text{cemento 407 (kg/m}^3\text{)} = 1823 \\ &2400 \text{ (kg/m}^3\text{)} - 149 \text{ (kg/m}^3\text{)} - 500 \text{ (kg/m}^3\text{)} = 1751 \text{ (kg/m}^3\text{)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Peso Arena} &= \text{Peso del } \acute{A}rido \times \text{A.C} \\ &1751 \text{ (kg/m}^3\text{)} \times 0,46 = 805,46 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Peso Grava} &= \text{Peso del } \acute{A}rido \times \text{A.C} \\ &1751 \text{ (kg/m}^3\text{)} \times 0,54 = 945,54 \end{aligned}$$

Árido combinado

$$\% \text{ Arena \#4} + \% \text{ Grava \#4} = 42 \text{ (G + A)}$$

$$91 \text{ A} + 0,51 \text{ G} = 42 \text{ (G + A)}$$

$$91 \text{ A} + 0,51 \text{ G} = 42 \text{ G} + 42 \text{ A}$$

$$49 \text{ A} = 41,5 \text{ G}$$

$$49 \text{ A} - 41,5 \text{ G} = 0$$

$$\text{A} = (41,5 / (41,5 + 49)) \times 100 = 45,8 \%$$

$$\text{G} = (49 / (49 + 41,5)) \times 100 = 54,14 \%$$

Anexo E

E.1.- Informe de laboratorio



CERTIFICADO DE ANALISIS N° 138/2017

DESCRIPCION CLIENTE

Cliente	DIEGO BERNAL	Contacto	Diego Bernal
Dirección	Universidad de Valparaiso		

DESCRIPCION MUESTRA

Muestra	Escoria de cobre	Fecha recepción	#####
Presentación	trozos	Inicio análisis	#####
N° Lote	Sin informacion	Lote interno	S304-1117
Recepción	Saco	Fecha emisión	23 de noviembre de 2017

RESULTADOS

Ensayo	Especificación	Muestra
Sulfatos solubles en agua	78,9x10 ⁻⁶ kg SO ₄ ²⁻ /kg de Escoria	0,0079%

METODOS

Norma Chilena 1444/1. Of 2010

INTERPRETACION

 Denis Beltran
 Analista Químico
 Laboratorio Farmacopea

 Q.F. Daniela Irarrázabal
 Jefe Departamento Técnico
 Laboratorio Farmacopea

- El presente Boletín de Análisis solamente da fe de la muestra recibida y analizada.

Figura E.1: Informe de ensayo de cloruros y sulfatos.

(Fuente: Elaboración Propia)

