



FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

**Prospección y Caracterización de las Escorias de Cobre del
Depósito Fundición Ventanas. Estudio de Factibilidad para
su empleo en Hormigones**

Por

Gonzalo Felipe Gálvez H.

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

Prof. Guía: Juan Eduardo Egaña Ramos.

Marzo, 2015

DEDICATORIA

A la persona que hizo esto posible, a quién le debo la vida, todo lo que soy y pudiese llegar a ser. A Nancy del Carmen Navarrete Carrasco quien ha sido mi Abuela, Madre, Padre y queridísima Amiga.

AGRADECIMIENTOS

A mis tíos, los cuales han estado presentes de una u otra forma en los años de estudio y formación, dándome su apoyo, comprensión y confiando en mis capacidades, en especial a Luis San Martín C, con quién he tenido la fortuna de contar en momentos difíciles. A todos ellos quienes conforman mi familia, muchas gracias.

De manera especial agradecer a mi profesor guía Juan Eduardo Egaña Ramos, orgulloso de haber recibido su gran dirección y sobre todo, haber conocido a una persona tan humana, dispuesta a ayudar y guiar este proceso con una voluntad de oro.

A mi profesor de matemáticas en etapa escolar, hoy en día gran amigo y una de las valiosas imágenes paternas que me ha regalado la vida, el señor Carlos Jeldes Navia, por haber estado en cada etapa ayudando de forma desinteresada, espero estar ahí para él en esta nueva etapa y por muchos años más.

A Emperatriz Villanueva, nuestra gran secretaria de escuela, quien siempre tiene una sonrisa y la disposición para ayudar a quien lo necesita, el ejemplo del amor con el que realiza su trabajo me acompañará siempre.

A mi gran amigo Jose Soto Maturana y su hermosa familia, por su gran ayuda para trasladar el material hacia los laboratorios.

Por último y de ninguna forma menos importante, agradecer a mis amigos y sus familias, quienes han estado apoyando siempre. Muchas gracias a todos ellos que me han regalado una amistad sincera día a día, gracias a toda esa gente que en distintas etapas estuvo conmigo e hizo esto posible.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTOS.....	3
ÍNDICE GENERAL.....	4
ÍNDICE DE TABLAS.....	6
ÍNDICE DE FIGURAS	7
RESUMEN	9
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES	10
1.1 INTRODUCCIÓN.....	11
1.2 OBJETIVOS	13
1.2.1 Objetivos Generales:.....	13
1.2.2 Objetivo Específicos:.....	13
1.3 HIPÓTESIS	14
1.4 ALCANCES	15
1.5 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	16
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	17
2.1 LA INDUSTRIA DE COBRE NACIONAL	18
2.1.1 Proceso de Producción	18
2.1.2 Situación actual en la Industria	20
2.2 ESCORIA DE COBRE.....	22
2.2.1 Origen de las Escorias de Fundición.....	22
2.2.2 Características de la escoria de fundición.....	23
2.2.3 Escoria y medio ambiente	24
2.2.4 Usos alternativos para la escoria de fundición	26
2.3 SOBRE ÁRIDOS Y SU DEMANDA	28
CAPÍTULO 3: PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	31
3.1 GENERALIDADES	32
3.2 EXTRACCIÓN DEL MATERIAL DE ESCORIA	33
3.3 CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA DE ESCORIA	35
3.4 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN.....	41
3.4.1 Ensayos a material grueso de escoria	41
3.4.2 Ensayos a material fino de escoria.....	46
3.4.3 Ensayos a árido convencional.....	49
3.4.4 Granulometría de áridos combinados	52

3.5 PLANTEAMIENTO DE LA EXPERIENCIA	55
3.5.1 Factorial de ensayos	55
3.5.2 Dosificación.....	56
3.5.3 Dosificación por colada	58
3.5.4 Fabricación de hormigones	59
3.5.5 Dimensión de las probetas.....	61
3.5.6 Ensayo de resistencia a la compresión	62
3.5.7 Ensayo de resistencia a la tracción por flexión	63
CAPÍTULO 4: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	64
4.1 GENERALIDADES	65
4.2 RESISTENCIA A COMPRESIÓN.....	65
4.3 RESISTENCIA A TRACCIÓN POR FLEXIÓN	68
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y PROPOSICIÓN DE FUTURAS INVESTIGACIONES	70
6.1 GENERALIDADES	71
6.2 CONCLUSIONES.....	71
6.3 PROPOSICIÓN DE FUTURAS INVESTIGACIONES	73
BIBLIOGRAFÍA	74
ANEXOS	76
ANEXO 1: DATOS GRANULOMÉTRICOS DE MUESTRAS DE ESCORIA.....	76
ANEXO 2: DATOS GRANULOMÉTRICOS Y CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE PORCIÓN GRUESA DE ESCORIA.	84
ANEXO 3: DATOS GRANULOMÉTRICOS Y CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE PORCIÓN FINA DE ESCORIA.	87
ANEXO 4: DATOS GRANULOMÉTRICOS Y CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE ÁRIDOS CONVENCIONALES.	90
ANEXO 5: GRANULOMETRÍA DE ÁRIDOS COMBINADOS	95
ANEXO 6: RESUMEN DE DOSIFICACIONES	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Producción nacional de Cobre por regiones (TMF) 2004 – 2013.....	20
Tabla 2.2: Consumo mundial de Cobre refinado años 2012 – 2013 (Miles de TM)...	21
Tabla 2.3: Composición química escoria de Cobre División Ventanas.....	24
Tabla 2.4: Test de toxicidad por lixiviación.....	26
Tabla 2.5: Volúmenes esperados de consumo de áridos en el país y la RM.....	30
Tabla 3.1: Tamaño de la muestra de ensayo de la grava.....	36
Tabla 3.2: Tabla resumen de granulometrías.....	36
Tabla 3.3: Grados de ensayo (Definidos por sus tamaños límites en mm).....	43
Tabla 3.4: Resultado desgaste de la grava escoria método “Desgaste de los Ángeles”	45
Tabla 3.5: Contenido de material fino menor a 0,080mm (%).	47
Tabla 3.6: Resumen de características físicas de la escoria.....	48
Tabla 3.7: Resumen de características físicas del árido convencional.	51
Tabla 3.8: Factorial de ensayos.....	55
Tabla 3.9: Resumen dosificaciones corregidas para 1 m ³ de hormigón.....	57
Tabla 3.10: Dosificaciones para una colada (0,06m ³).	58
Tabla 4.1: Resultados resistencia a la compresión.....	65
Tabla 4.2: Resultados densidades aparentes.....	67
Tabla 4.2: Resultados resistencia a la tracción por flexión.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Proceso de fundición.....	19
Figura 2.2: Relación producción de Cobre y precio.....	21
Figura 2.3: Escoria de Cobre deposito Ventanas; arena abrasiva	27
Figura 3.1: Sectores de acopio y retiro de materiales en el depósito.....	33
Figura 3.2: Zonas de extracción de muestras del depósito	34
Figura 3.3: Granulometría promedio de escoria M1.....	37
Figura 3.4: Granulometría promedio de escoria M2.....	37
Figura 3.5: Granulometría promedio de escoria M3.....	38
Figura 3.6: Granulometría promedio de escoria M4.....	38
Figura 3.7: Resumen de granulometrías.....	39
Figura 3.8: Distribución de tamaños escoria de Cobre fundición Ventanas.....	40
Figura 3.9: Granulometría promedio de la grava escoria.....	41
Figura 3.10: Instrumento para desgaste de áridos.....	42
Figura 3.11: Tamices para ensayo “Desgaste de los Ángeles”.....	44
Figura 3.12: Granulometría promedio de la arena escoria.....	46
Figura 3.13: Granulometría promedio de la grava 40/20.....	49
Figura 3.14: Granulometría promedio de la grava 20/5.....	50
Figura 3.15: Granulometría promedio de la arena convencional.....	50
Figura 3.16: Granulometría árido combinado Grava 40/20 – gravilla 20/5.....	52
Figura 3.17: Granulometría árido combinado Grava 40/5 – Arena.....	53
Figura 3.18: Granulometría árido combinado Grava escoria 40/5 – Arena.....	53
Figura 3.18: Granulometría árido combinado Arena escoria – Arena convencional..	54
Figura 3.19: Granulometría árido combinado Grava escoria 40/5 – (Arena escoria + Arena convencional).....	54
Figura 3.20: Ensayo asentamiento de cono.....	60
Figura 3.21: Probetas luego del llenado.....	60
Figura 3.22: Probetas cúbicas.....	61
Figura 3.23: Probetas tipo viga.....	61

Figura 3.24: Ensayo de compresión.....	62
Figura 3.24: Ensayo de tracción por flexión.	63
Figura 3.24: Viga luego del ensayo de tracción por flexión.	63
Figura 4.1: Resistencia a compresión.	66
Figura 4.2: Densidades de los hormigones.	67
Figura 4.3: Resistencia tracción por flexión.....	69

RESUMEN

Uno de los mayores problemas del sector Quintero – Ventanas hoy en día, es sin duda la contaminación y depredación por parte de grandes empresas. El producir con conciencia medio ambiental, el reutilizar o encontrar soluciones alternativas a los desechos que se generan se transformó en algo de primera necesidad. La presente investigación busca ser una herramienta que incentive y facilite el uso de escoria de cobre en hormigones, para con esto reducir el volumen del depósito Fundición Ventanas y mejorar la calidad de vida de los pobladores.

La presente investigación está orientada a ser una prospección del depósito de Fundición Ventanas, para conocer las características de su escoria y su grado de homogeneidad. En base al diseño experimental se determinaron 2 tipos de reemplazo de escoria por árido convencional, además de un hormigón patrón para ser una referencia y efectuar una comparación. La fabricación de estos hormigones así como todos los ensayos que a ellos han sido dispuestos, fue realizada en los laboratorios de hormigones de la Universidad de Valparaíso.

A lo largo de la investigación y a medida que se realizaron los ensayos, se pudo observar que esta escoria no presenta limitaciones como árido y puede ser utilizada en hormigones, además de no mostrar diferencias significativas en su resistencia a compresión y flexo-tracción, siempre y cuando se considere tratar la arena de escoria para que cumpla con la distribución granulométrica que exige la norma. Al ocupar la escoria solo como grava, esta no presenta problemas en su comportamiento frente a esfuerzos de compresión o flexo-tracción.

Capítulo 1: Generalidades

1.1 Introducción

La escoria de cobre es un residuo del proceso piro metalúrgico aplicado a los concentrados de minerales de cobre que hacen ingreso a las fundiciones. Esta escoria comúnmente es depositada en vertederos autorizados. En algunas ocasiones, si hay una factibilidad comercial y antes de llegar a los vertederos, éstas son sometidas a un proceso de flotación con el cual se pueden recuperar los metales que quedasen alojados en ella [Orizola06].

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 de nacionales: Caletones, Fundición 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 [Pavez “et al”04].

El incorporar este material en la industria de la construcción no es algo nuevo en Chile, a nivel nacional se han utilizado escorias en la fabricación de ladrillos refractarios, lanas minerales, bases estabilizadas y como material abrasivo para limpieza de superficies de acero [Sánchez “et al”04].

En el plano internacional tampoco es novedad la implementación de escoria, dando excelentes resultados como base granular en la construcción de caminos, líneas férreas y terraplenes [Ariño & Mobasher99].

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 [Orizola06].

Varios son los estudios que se han realizado tanto a nivel nacional como internacional sobre el empleo de escorias de fundición como áridos para la confección de hormigones, pero nada se ha dicho sobre cuanto material generado por estas fundiciones es realmente aprovechable, o si el material acopiado es relativamente homogéneo en términos granulométricos.

La presente investigación propone como primera etapa, realizar una prospección y caracterización del depósito de la *Fundición de cobre Ventanas, V región*; logrando con esto determinar si el material de escoria acopiado en toda su extensión, presenta características apropiadas y compatibles con los requisitos establecidos por las normas chilenas sobre la confección de hormigones.

Para estos fines se procedió a definir la ubicación y dimensionamiento aproximado del depósito para, en seguida, obtener muestras representativas desde diferentes sectores. Cada muestra fue analizada granulométricamente, lo que permitió reconocer el material aprovechable y de necesitarse, realizar un chancado del sobre tamaño, para luego hacer una comparación entre las muestras analizadas, obteniendo información sobre el grado de homogeneidad del depósito.

Al no existir diferencias notables entre las muestras se procedió a reunir un común de este material utilizable, para luego separarse en fracción gruesa y fina, las cuales fueron sometidas a una serie de ensayos de caracterización.

Una segunda y última etapa consistió en la realización de un estudio experimental en el cual se compararon mezclas de hormigón con diferentes configuraciones entre escoria y áridos convencionales, estudiando sus propiedades mecánicas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Generales:

1. Determinar si el material de escoria generado por la *Fundición de cobre Ventanas, V región*, presenta características apropiadas y compatibles con los requisitos establecidos por las normas chilenas para la confección de hormigones.
2. Evaluar el efecto del reemplazo del árido convencional por escoria de cobre, sobre las propiedades mecánicas del hormigón.

1.2.2 Objetivo Específicos:

1. Obtener información aproximada sobre la homogeneidad de la escoria acopiada.
2. Obtener una caracterización de la escoria de este depósito como árido.
3. Determinar el efecto del reemplazo de árido normal por escoria de cobre sobre las resistencias a compresión y a flexo tracción de hormigones.

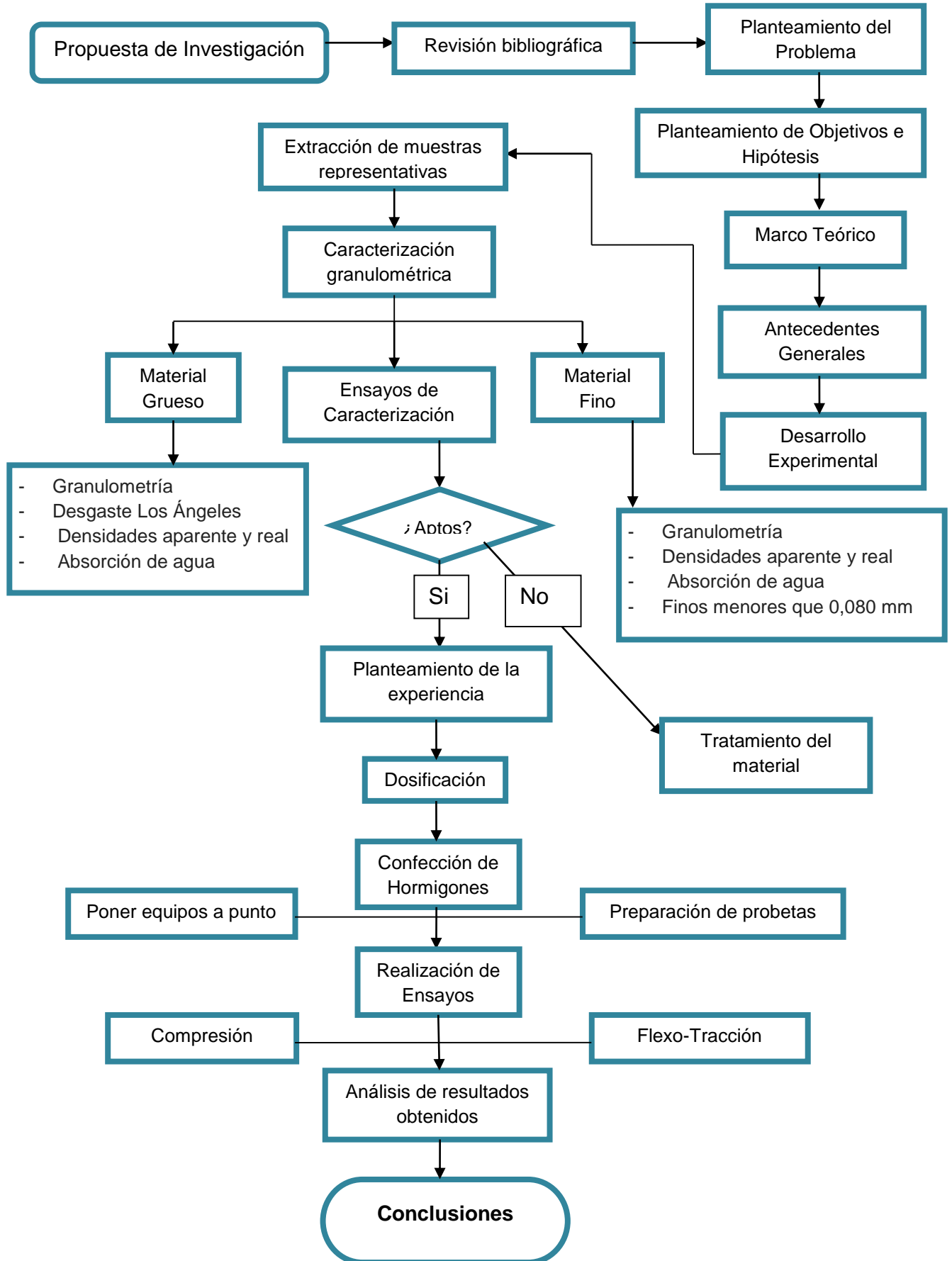
1.3 Hipótesis

Se plantea que la escoria acopiada presenta características apropiadas y homogéneas para la confección de hormigones, que podrían mostrar mejoras en su resistencia a la compresión y flexo-tracción.

1.4 Alcances

- Se toman 4 muestras representativas de escoria, de cuatro sectores diferentes del deposito *Fundición de Cobre Ventanas, V región*.
- El tipo de cemento utilizado es portland puzolánico grado corriente.
- Tamaño máximo nominal de árido 40mm.
- Se fabrican hormigones con tres mezclas de áridos:
 - Mezcla A: Grava de escoria + mezcla arena (escoria + convencional)
 - Mezcla B: Grava de escoria + arena convencional.
 - Mezcla P: Grava convencional + arena convencional (Patrón)
- Se realizan ensayos de Compresión y Flexo-tracción.

1.5 Metodología de la Investigación



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 este 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 lixiviación¹ 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.

¹ Lixiviación: Tratamiento con solución ácida y algunos medios de precipitación para obtener precipitados de cobre.

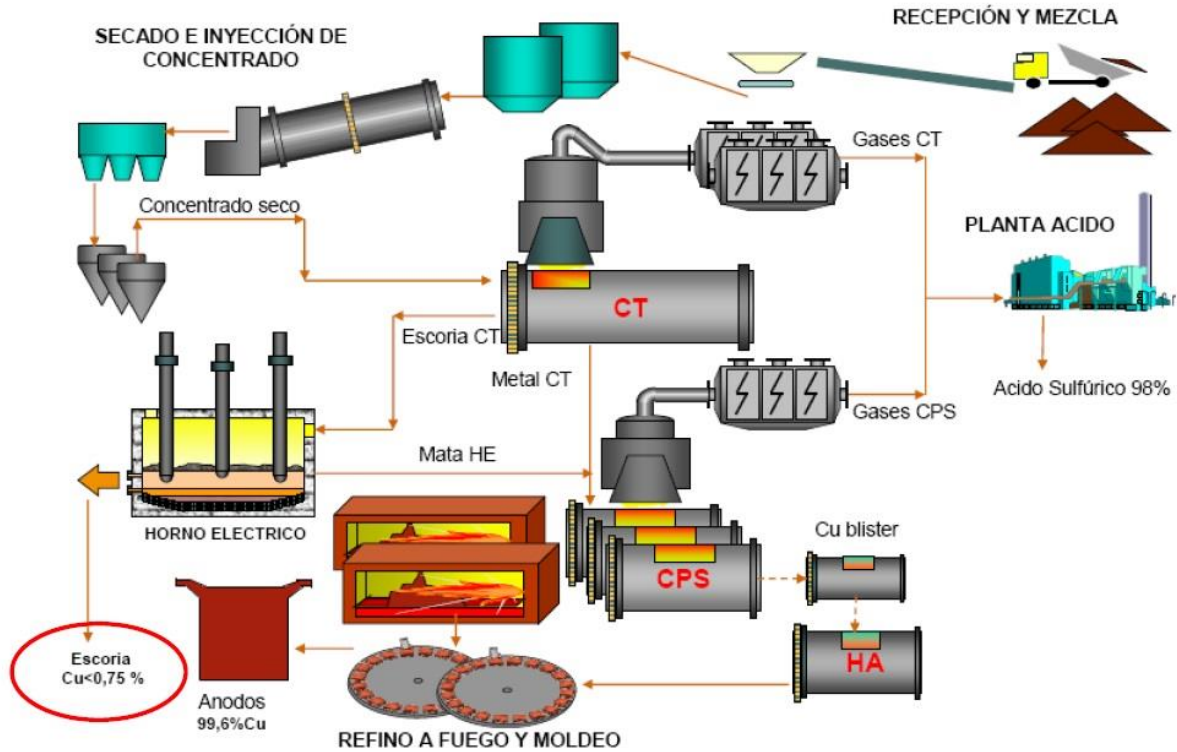


Figura 2.1: Proceso de fundición.
(Fuente: CODELCO)

En la figura 2.1 se observan las diferentes etapas que conforman la obtención de cobre a partir de mineral sulfurado por la ruta pirometalurgia, mediante procesos de secado y hornos a altas temperaturas se puede obtener el producto deseado, también se pueden notar 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 como escoria.

2.1.2 Situación actual en la Industria

La industria del cobre es por estos días y según indicadores, seguirá siendo por mucho tiempo más, uno de los pilares fundamentales de la economía de Chile. Esto de seguro es debido a que este material se ocupa en sectores muy diversos y presenta excelentes propiedades para la aplicación en cada uno de ellos, siendo los principales destinos el año 2013, países como China con 2.094.200 tmf y Japón con 720.800 tmf, y por continentes, Asia con 3.892.000 tmf superando a América y a Europa, que totalizaron 872.200 tmf, y 723.600 tmf, respectivamente.

Tabla 2.1: Producción Nacional de Cobre por Regiones (tmf) 2004 – 2013

Región \ Año	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Arica y Parinacota (15)	-	-	-	-	-	76	509	1.141	529	647
Tarapacá (01)	680.334	608.377	653.468	647.890	671.159	730.739	694.866	595.891	431.054	587.881
Antofagasta (02)	2.890.464	2.901.951	2.923.339	3.184.384	2.905.992	2.940.184	2.942.178	2.721.201	2.939.958	3.048.303
Atacama (03)	441.092	432.924	449.058	460.523	453.310	428.927	418.259	427.500	389.329	420.992
Coquimbo (04)	397.596	373.678	370.681	341.669	398.056	365.243	488.787	570.438	576.145	577.495
Valparaíso (05)	341.764	335.295	329.701	317.942	304.162	289.266	267.891	322.685	344.174	329.422
Metropolitana (13)	231.578	227.262	226.017	229.305	233.689	235.490	217.266	198.119	362.707	415.784
Lib. Gral. B. O'Higgins (06)	435.658	450.927	429.497	420.016	397.208	421.919	426.892	420.220	440.814	470.596
Aisén (11)	314	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	5.418.800	5.330.414	5.381.761	5.601.729	5.363.576	5.411.844	5.456.648	5.257.195	5.484.710	5.851.120

Fuente: SERNAGEOMIN, 2014

En la Tabla 2.1 se muestra la producción de cobre por regiones de los últimos 10 años, viéndose un incremento considerable en la producción en los últimos 3 años, esta alcanzó a 5.851.120 tmf, lo que equivale a un aumento del 7% respecto del 2012, el país continúa siendo el principal productor mundial.

No obstante el aumento de la producción, el precio del cobre disminuyó respecto al año 2012 en un 8%, para el año 2010 se registró un precio promedio de US\$342 c/lb y cerró el 2013 con un precio promedio de US\$332 c/lb. Esta situación tiene una fuerte relación con el actual desempeño de China, sus indicadores y sistema financiero.

En la Figura 2.2 se puede apreciar la relación entre producción y precio que ha ido mostrando el cobre nacional en los últimos 10 años, donde a pesar de bajar su precio, esto no ha ido en desmedro de su relevancia primordial en la economía a nivel país, esto reflejado en la clara alza en su producción.

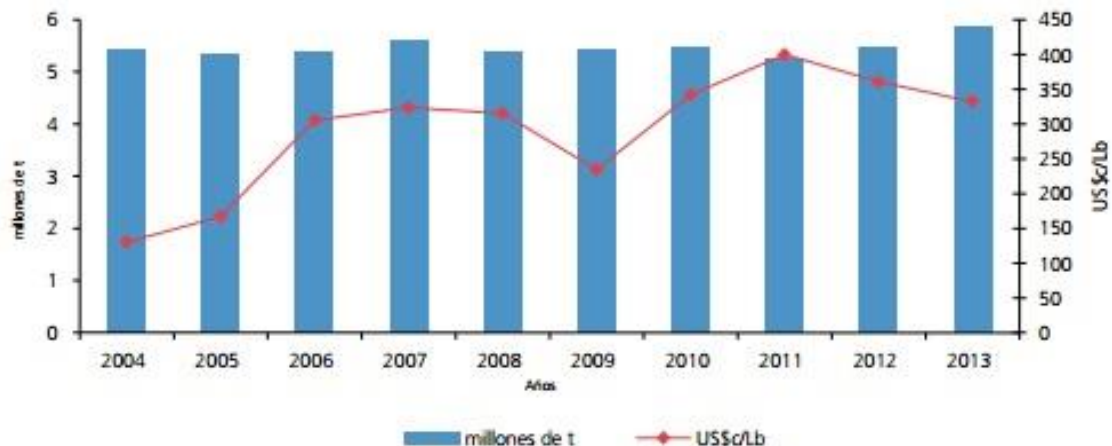


Figura 2.2: Relación producción de cobre y precio.
(Fuente: SERNAGEOMIN, 2012)

Se muestra además en la Tabla 2.2 el consumo mundial de cobre refinado años 2012 – 2013, que presenta una tendencia al aumento promedio del 4,7%.

Tabla 2.2: Consumo Mundial de Cobre Refinado años 2012 – 2013 (Miles de Tm)

País	2012	2013	Var TM	Var %
China	8.840	9.830	990	11,2
Estados Unidos	1.758	1.842	84	4,8
Alemania	1.107	1.127	20	1,8
Japón	985	994	9	0,9
Corea del Sur	717	704	-13	-1,8
Italia	570	574	4	0,7
Rusia	494	484	-10	-2,0
Turquía	429	453	24	5,5
Taiwán	432	435	3	0,7
Brasil	432	432	0	0,0
India	456	421	-35	-7,6
Principales países	16.221	17.298	1.076	6,6
Resto del mundo	3.833	3.705	-128	-3,3
Total mundial	20.054	21.003	948	4,7

Fuente: COCHILCO, 2014

2.2 Escoria de Cobre

2.2.1 Origen de las Escorias de Fundición

La escoria de cobre se obtiene como material de desecho a partir del proceso piro-metalúrgico. Durante la fundición del mineral concentrado de cobre se producen dos fases líquidas inmiscibles entre sí, las que se pueden clasificar como: mata rica en cobre (sulfuro) y la escoria (óxido). La mata pasa a procesos posteriores de conversión, mientras que la escoria fundida se descarga directamente o pasa a procesos de recuperación de cobre, logrando que tengan un porcentaje menor al 1% de cobre antes de ser descartadas. En las etapas de recuperación de cobre en hornos de limpieza y HLE es posible recuperar el cobre contenido en escorias de alta ley, las que se encuentran entre el 4 – 10% de cobre, que provienen de los procesos de fusión (horno) o conversión. Actualmente Chile se usan tres procesos para el tratamiento de escorias para obtener una escoria con una ley lo más baja posible de cobre. Estos procesos son:

- a) Hornos eléctricos
- b) Plantas de flotación
- c) Hornos de limpieza tipo Teniente u hornos HLE

Los hornos eléctricos y los tipos Teniente son esencialmente el mismo proceso, pues se busca lograr la reducción del contenido de magnetita (Fe_3O_4) en la escoria. Esto se realiza a través de un agente sólido, líquido o gaseoso (carbono, hidrógeno y algo de azufre), así cambiando las características químicas y físicas de la escoria. Posteriormente esta mezcla se deja sedimentar, obteniendo así una fase rica en cobre (50-70%) que es devuelta a los convertidores y una escoria de descarte que es llevada a botaderos (0,7-1%).

El horno de tratamiento de escoria posee las siguientes etapas:

- 1) Carga del horno
- 2) Reducción de la magnetita: esta etapa se traduce en una disminución de la viscosidad de la escoria, permitiendo así la separación de las fases contenidas en la escoria. Para lograr esta separación se trabaja con hornos a temperaturas superiores a los 1200 °C, y debido a que las reacciones involucradas en esta etapa son endotérmicas, es necesario generar calor mediante quemadores.

- 3) Sedimentación: esta etapa es necesaria para separar las distintas fases que se producen en la limpieza de la escoria, y es posible pues las partículas con contenido sulfuro-metálico poseen mayor densidad que la escoria. Durante esta etapa es necesario mantener la temperatura del horno, y el tiempo de sedimentación varía entre los 30 y 60 minutos.

El tamaño de los botaderos de escoria va creciendo año a año, por lo que el tema de la reutilización de escorias se ha convertido en un punto de gran interés para las empresas metalúrgicas. Anualmente las fundiciones de cobre del país producen cerca de 4,5 millones de toneladas de desechos, cuyo único destino posible son los depósitos que se sitúan cerca de las plantas. Estudios realizados por diversas universidades nacionales han determinado que por cada tonelada de cobre producido se generan aproximadamente 2,2 toneladas de escoria, y que tan sólo la División del Teniente, 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. [Sepúlveda06]

Entre las principales empresas a nivel nacional productoras de escoria de cobre se encuentran las fundiciones de Codelco (Chuquicamata, Potrerillos, Ventanas, Paipote y Caletones), de Angloamerican Chile (Chagres) y de Falconbridge (Altonorte).

2.2.2 Características de la escoria de fundición

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:

- 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 %

De la literatura se ha podido obtener que las escorias están compuestas por diversos elementos, en la Tabla 2.3 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 2.3: 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	10.00%

Fuente: Control de Calidad, Codelco Ventanas

Como se observa de la Tabla 2.3, 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 de escorias de fundición generaría un importante aporte para dichas empresas.

2.2.3 Escoria y medio ambiente

La CONAMA define escoria como una mezcla de óxidos de hierro y silicatos u otros compuestos producidos durante el proceso de fusión y conversión de concentrados sulfurados que no se realimenten directamente a ninguna operación unitaria considerada en la fuente emisora y que es descartada para su disposición final en botaderos o para su posterior tratamiento en una unidad de procesamiento de minerales.

En cuanto a las legislaciones existentes para la emisión de residuos sólidos mineros, se puede decir que se trata en términos generales lo concerniente a residuos sólidos en la Ley N° 19.300, sobre bases generales del medio ambiente (LBGMA), sin establecer una normativa específica. Esto se debe a que no establece una definición de alcance general de lo que se entiende por residuo. El código sanitario, que data de 1967, ha señalado que es necesario elaborar reglamentos que fijen las condiciones de saneamiento y seguridad relativas a la acumulación, selección, industrialización, comercio o disposición final de basuras y desperdicios.

A pesar de que existen legislaciones que regulan el almacenamiento adecuado de las escorias de fundición posterior a su procesamiento, estas legislaciones no contemplan la revaloración, recuperación, reutilización ni reciclaje de las escorias, lo que contribuiría a la descontaminación del medio ambiente.

Los residuos mineros son los que cuentan con una mayor cantidad de normas y permisos específicos, donde los que son de directa importancia para el presente trabajo son aquellos permisos relacionados con los depósitos de botaderos. Este permiso está descrito en el artículo 86 del SEIA², el que alude al artículo 318 del D.S. N°72/85 del Ministerio de Minería, reglamento de seguridad minera y los permisos para evacuar, tratar o disponer residuos industriales, descrito en el artículo 91 del SEIA, el que alude al artículo 71 letra b) del Código Sanitario, construcción, modificación y ampliación de cualquier obra destinada a la evacuación, tratamiento o disposición final de residuos industriales o mineros. [Cochilco04]

Codelco ha efectuado análisis de toxicidad por Lixiviación de la escoria utilizando dos test, el SPLP (Synthetic Precipitation Leaching Procedure) US EPA 1312 y el TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) US EPA 1311. Las pruebas fueron realizadas para los siguientes elementos; As, Se, Hg, Ba, Cd, Cr, Pb y Ag, obteniendo los resultados detallados en la Tabla 2.4

² SEIA: Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental

Tabla 2.4: Test de Toxicidad por Lixiviación

ELEMENTO	UNIDAD	Concentración	Concentración EPA
As	mg/L	0.01	5.0
Se	mg/L	< 0.01	100.0
Hg	mg/L	< 0.01	1.0
Ba	mg/L	0.019	5.0
Cd	mg/L	<0.005	5.0
Cr	mg/L	<0.01	0.2
Pb	mg/L	<0.5	1.0
Ag	mg/L	<0.01	5.0
ph		8.97	

Fuente: Control de Calidad, Codelco Ventanas

Conforme a los resultados producto del análisis de laboratorio efectuados y de acuerdo a lo establecido en el artículo 23 del “*Reglamento Sanitario sobre manejo de residuos Peligrosos*” (MINSAL), la escoria final de División Ventanas, no correspondería a un residuo peligroso.

2.2.4 Usos alternativos para la escoria de fundición

Hasta el momento, la reutilización de escorias de fundición de cobre ha sido mínima, pero, debido a que es una preocupación latente tanto para el gobierno como para la industria minera debido al impacto medioambiental que está produciendo, se han ido creando diversos usos alternativos de la escoria para reducir el tamaño de los botaderos existentes hoy en día. A nivel mundial existen una serie de usos para la escoria de fundición del cobre, siendo las principales:

Balasto: más bien conocido como relleno en las líneas férreas, se usa para formar una cama en las mismas, haciéndola firme y sólida. También es utilizado como lastre en los barcos, donde lastre es cualquier material usado para estabilizar un barco. La escoria es depositada en el fondo del barco para hundirlo un poco más en el agua, y así evitar volcamientos.

Arena abrasiva: permite remover la pintura, capas externas y corrosión de estructuras industriales. Esto se realiza mediante una fuerza mecánica que impulsa las partículas abrasivas contra de una superficie metálica o no metálica de una estructura o producto, así removiendo contaminantes o condicionando la superficie para un tratamiento posterior. En inglés esta aplicación es conocida como *Sand Blasting*. La empresa NST Centre plantea que el poder abrasivo de la escoria del cobre es usada principalmente para remover fácilmente los contaminantes de superficies de estructuras.

La escoria viene con forma cúbica, y por lo tanto con sus lados bastante afilados, generando un mejor poder abrasivo. Estos productos abrasivos a su vez generan una baja cantidad de polvo. Además su uso no genera problemas a la salud para las personas.



Figura 2.3: Escoria de cobre deposito Ventanas; Arena abrasiva

EbonyGrit: Producto creado por la empresa Opta Minerals Inc., obteniéndose como un producto secundario de la escoria proveniente de la industria del cobre. El Ebonygrit es una arena abrasiva compuesta generalmente por ferro-silicatos (Fe_2SiO_4) y óxidos, y se forma cuando la escoria fundida es enfriada bruscamente en agua. El proceso de enfriamiento rompe la escoria en partículas angulosas, haciendo que sea un producto abrasivo ideal [Opta Minerals Inc06].

Material de construcción: existen diversos estudios que buscan la reutilización de la escoria en materiales de construcción, especialmente como aditivo para cementos, reemplazando en cierta manera las puzolanas y yeso, sirviendo para el mejoramiento en la tecnología de la construcción de carreteras [Wang y Emery04].

Obtención y recuperación de metales valiosos a partir de la escoria: Actualmente existen una serie de estudios que buscan reciclar la escoria de diversos procesos a través de la recuperación de metales que se encuentran en su composición, y que hasta el momento no son recuperados. Entre estos procesos se puede encontrar la recuperación de cobalto, níquel, molibdeno y compuestos de hierro, entre otros, generando una posibilidad económica y de mejoramiento ambiental considerable. Investigaciones realizadas por CONICYT han permitido estudiar la lixiviación de escorias con ácido sulfúrico para la recuperación de cobre (Cu) y molibdeno (Mo). En dichos estudios se observó que la cinética de lixiviación del hierro es equivalente e, incluso superior, a la de Cu y Mo, incluso se planteó que podría estar influyendo en la lixiviación del cobre al oxidarse desde Fe(II) a Fe(III) en la solución. Por lo tanto, debido a la alta concentración de hierro en la escoria, es inevitable su lixiviación junto con el cobre y el molibdeno. De acuerdo a estos primeros resultados, sobre el 98% del consumo de ácido está asociado a la disolución del hierro para una escoria con 0,8% de Cu y 0,3% de Mo [CONYCYT05].

2.3 Sobre Áridos y su demanda

Áridos: Partículas granulares de tamaño variables, de origen pétreo, forman parte del esqueleto rígido del hormigón y este se opone a las variaciones de volumen. Este agregado constituye aproximadamente entre un 65% a un 75% del volumen total de la mezcla de hormigón. El origen de los áridos nace a través de la fragmentación de distintas rocas de la corteza terrestre de forma natural o artificial. El agregado limita la resistencia del hormigón. Ya sea que un agregado débil no puede producir concreto resistente y, además, afecta la durabilidad y el comportamiento de hormigón [Neville95].

Fundamentalmente está constituido en gravas y arenas, las gravas, se define como el porcentaje de árido que es retenido en el tamiz nominal de 5 mm. La arena se define como el porcentaje de árido que pasa el tamiz de abertura nominal de 5 mm y es retenido en el de 0.08 mm [NCh165.Of77].

Este agregado tiene por un lado una razón económica, ya que el árido generalmente es más barato que el cemento, porque resulta más conveniente en la mayoría de los casos ocupar un tamaño máximo nominal y un mínimo de cemento, y también le otorga al hormigón una mayor durabilidad, debido a que le confiere al hormigón un menor desgaste en el tiempo.

Todos los áridos deben cumplir con un mínimo de condiciones, para su integración del hormigón, la trabajabilidad es conjunto de características de los áridos, las cuales le confieren al hormigón en su estado fresco un mayor manejo.

Para lograr esta trabajabilidad también se debe tener en cuenta otra condición, la de la granulometría de los áridos, de acuerdo a lo establecido en la norma NCh165 Of 77 "Áridos para morteros y hormigones – Tamizado y determinación de la granulometría", se define como la distribución de los porcentajes en peso para cada tamaño de partículas, se obtiene pasando la muestra de áridos en diferentes tamices, los cuales tienen diferentes aberturas.

También deben cumplir con la condición de contenido de granos finos, generalmente esta condición se la da el cemento, se utiliza para obtener una mayor trabajabilidad, pero existen hormigones que tienen una baja dosis de cemento y ahí es cuando es necesario que los áridos aporten ese porcentaje.

Por último es necesario que el árido cumpla con la condición de la resistencia propia, es de un tanto difícil de medir de forma directa y se recurre a la norma NCh 1369.Of 78 que indica los siguientes valores:

Abrasión máxima de 40% para hormigones sometidos a desgaste y un 50 % para hormigones normales.

Por lo general los áridos nacionales tienen una buena resistencia propia, debido a que provienen de rocas ígneas de alta dureza.

Es de interés conocer las proyecciones de la demanda, y también oferta, de este producto para los próximos años. Para ello es necesario, idealmente, basarse en los escenarios del sector construcción, para poder identificar en primer lugar la demanda de aquellos insumos directamente relacionados al consumo de áridos: cemento y asfalto.

De este modo, el consumo de áridos en relación al consumo de cemento en Chile, para el año 2005 estaría variando entre 18,0 y 27,0 millones de m³ por año, lo que significa un aumento desde el 25% al 90% de volumen que el actual, estimado en 14,3 millones de m³/año [CDT01]. Es así como, el consumo de áridos en asfaltos en Chile para el año 2005 estaría variando entre 2,9 y 4,4 millones de m³ por año, lo que significa un aumento desde el 15% al 77% respecto del volumen actual, estimado en 2,5 millones de m³/año [CDT01].

Tabla 2.5: Volúmenes esperados de consumo de áridos en el país y la RM

Consumo de áridos (mill. M3)	1999		2005	
	País	RM	País	RM
Cemento	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

Capítulo 3: Programa Experimental

3.1 Generalidades

La presente investigación es 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.

En el presente capítulo se presentan las medidas a seguir para el desarrollo de la investigación, además del proceso y las herramientas necesarias, con el fin de responder la hipótesis de investigación.

3.2 Extracción del material de escoria

Se extrajo material de *Depósito de Escorias de fundición Ventanas*. Se extrajeron un total de 4 muestras, cada una de 80kg 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 3.1: Sectores de acopio y retiro de materiales en el depósito.
(Fuente: Elaboración propia).

La figura 3.1 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

Muestra 4: M4



Figura 3.2: Zonas de extracción de muestras del depósito
(Fuente: Elaboración propia).

La figura 3.2 nos muestra los sectores de donde se extrajo Escoria, se puede apreciar la disposición de acuerdo a la antigüedad de esta en el depósito, siendo M1 la muestra de escoria más antigua, M4 la muestra de escoria más nueva, la cual está dispuesta en los nuevos botaderos, M2 y M3 son las muestras de escoria de antigüedad media. Según antigüedad las muestras se podrían escribir en la siguiente forma:

M1>M2>M3>M4

3.3 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 posee el árido. Se realizó el procedimiento ejecutado de acuerdo a los requisitos y procedimientos establecidos por las normas chilenas siguientes:

- NCh163. Of79 “Árido para morteros y hormigones - Requisitos generales”
- NCh164. Of76 “Árido para morteros y hormigones - Extracción y preparación de muestras”.
- NCh165. Of77 “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 25kg, tamaño de muestra determinado según NCh165. Of77; Nos sugiere un peso de muestra mínimo según el tamaño máximo absoluto (D_a) 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 $D_a = 50\text{mm}$. Para asegurar un tamaño mínimo de muestra adecuado, se utilizó el peso inmediatamente superior que corresponde a un $D_a = 63\text{mm}$.

Tabla 3.1: Tamaño de la muestra de ensayo de la grava

Tamaño máximo absoluto (Da), 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. Of77

La siguiente tabla nos muestra un resumen de los resultados granulométricos de las 4 muestras extraídas del depósito, presentando los valores promedios. El detalle de cada muestra se adjunta en los anexos.

Tabla 3.2: Tabla resumen de granulometrías

Tamiz		% Que pasa				Promedio
		Prom M1	Prom M2	Prom M3	Prom M4	
80 mm.	3"	100	100	100	100	100
63 mm.	2 1/2"	100	100	100	100	100
50 mm.	2"	100	100	100	100	100
40 mm.	1 1/2"	97	97	97	97	97
25 mm.	1"	89	88	87	89	88
20 mm.	3/4"	70	69	64	68	68
12,5mm	1/2"	40	42	43	40	41
10 mm.	3/8"	26	28	27	26	27
5 mm.	Nº 4	11	13	12	11	12
2,5mm	Nº 8	5	6	6	5	6
1,25mm	Nº 16	3	4	4	3	4
0,630mm	Nº 30	2	2	2	2	2
0,315mm	Nº 50	1	2	2	1	2
0,160mm	Nº 100	1	1	1	1	1
Residuo		0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Las Figuras 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7 respectivamente, muestran gráficamente el resultado de la caracterización granulométrica de las 4 muestras de Escoria extraídas del depósito.

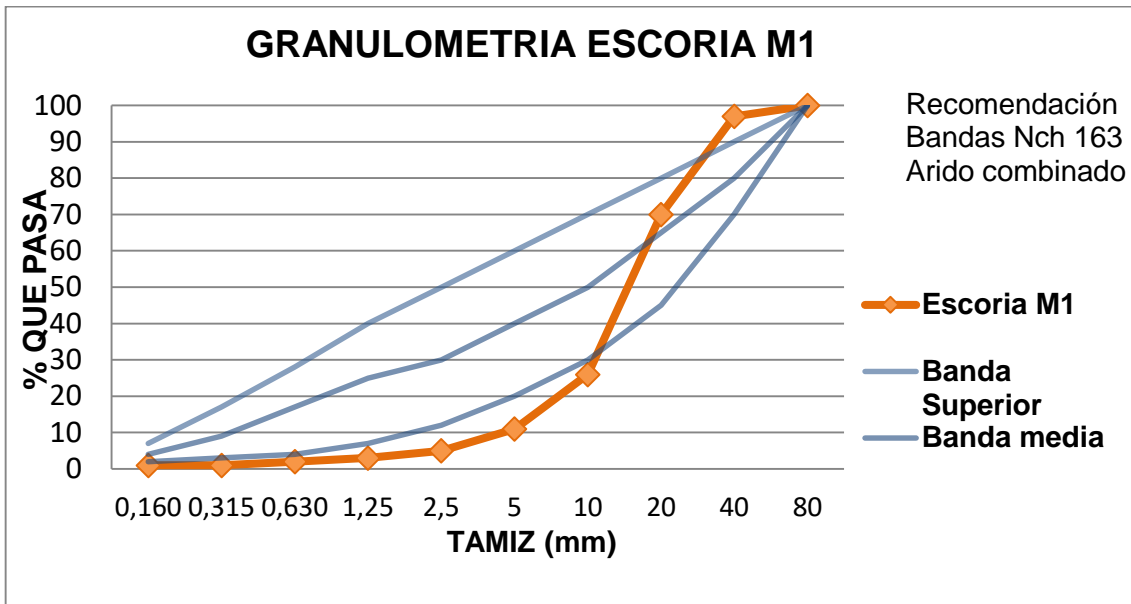


Figura 3.3: Granulometría promedio de Escoria M1.

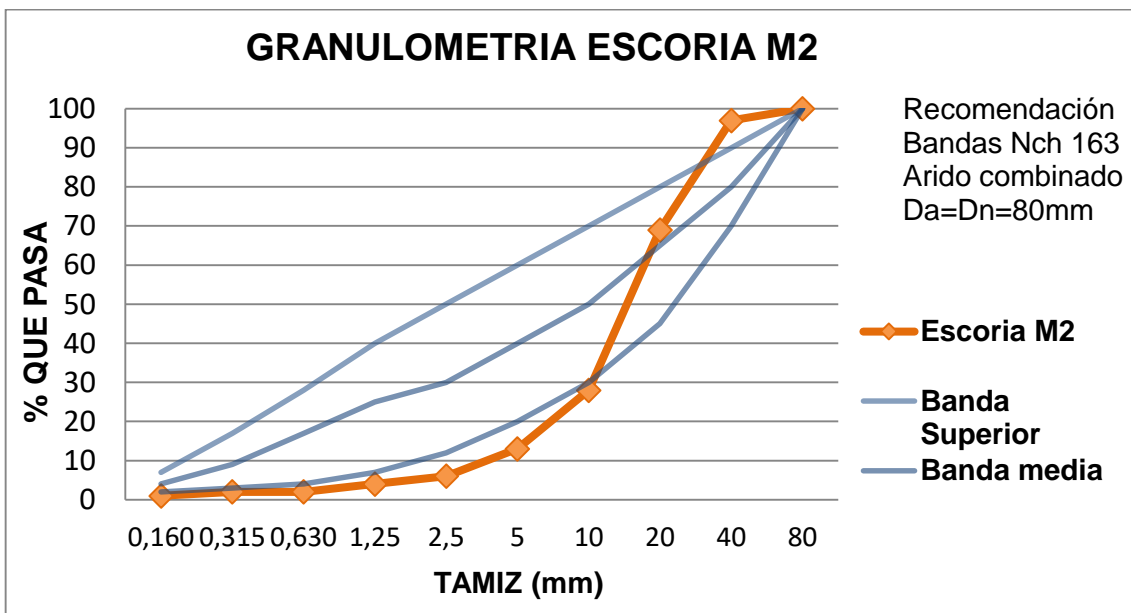


Figura 3.4: Granulometría promedio de Escoria M2.

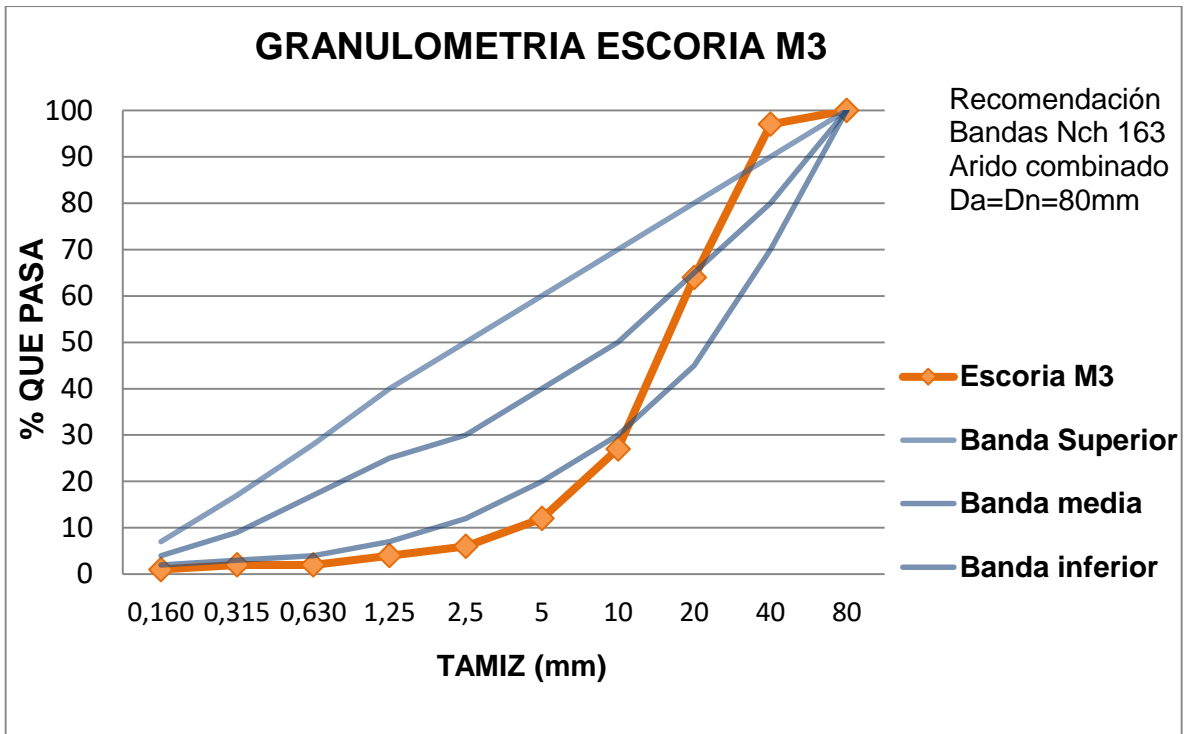


Figura 3.5: Granulometría promedio de Escoria M3.

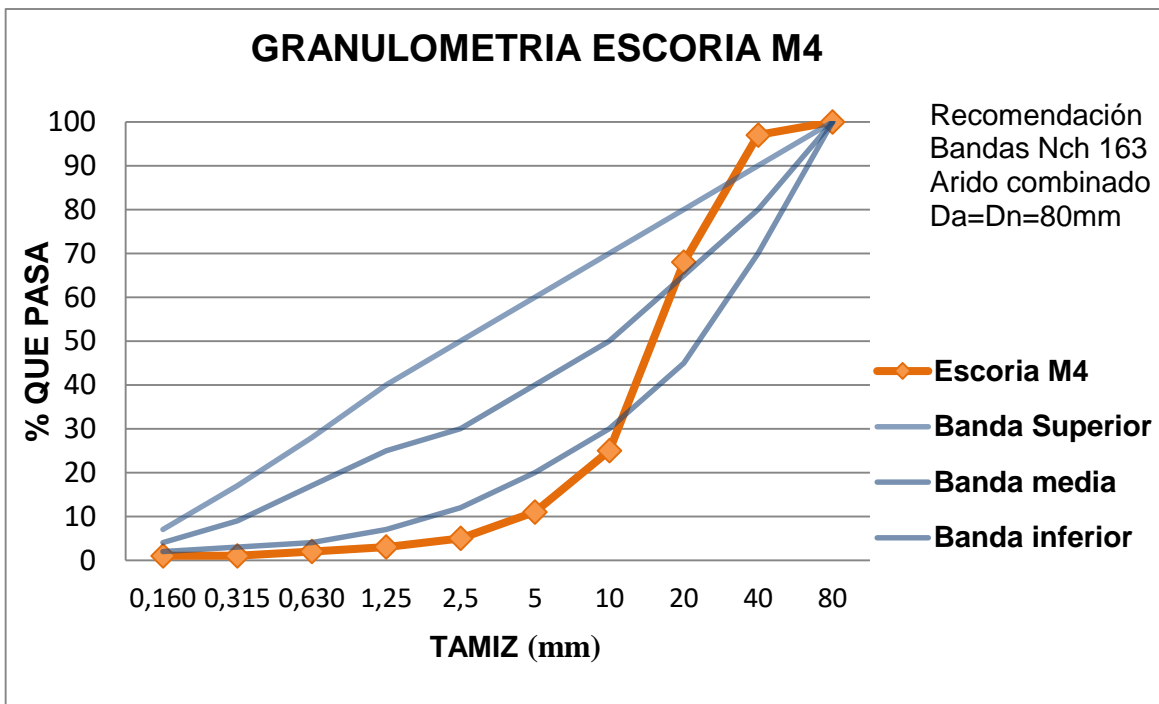


Figura 3.6: Granulometría promedio de Escoria M4.

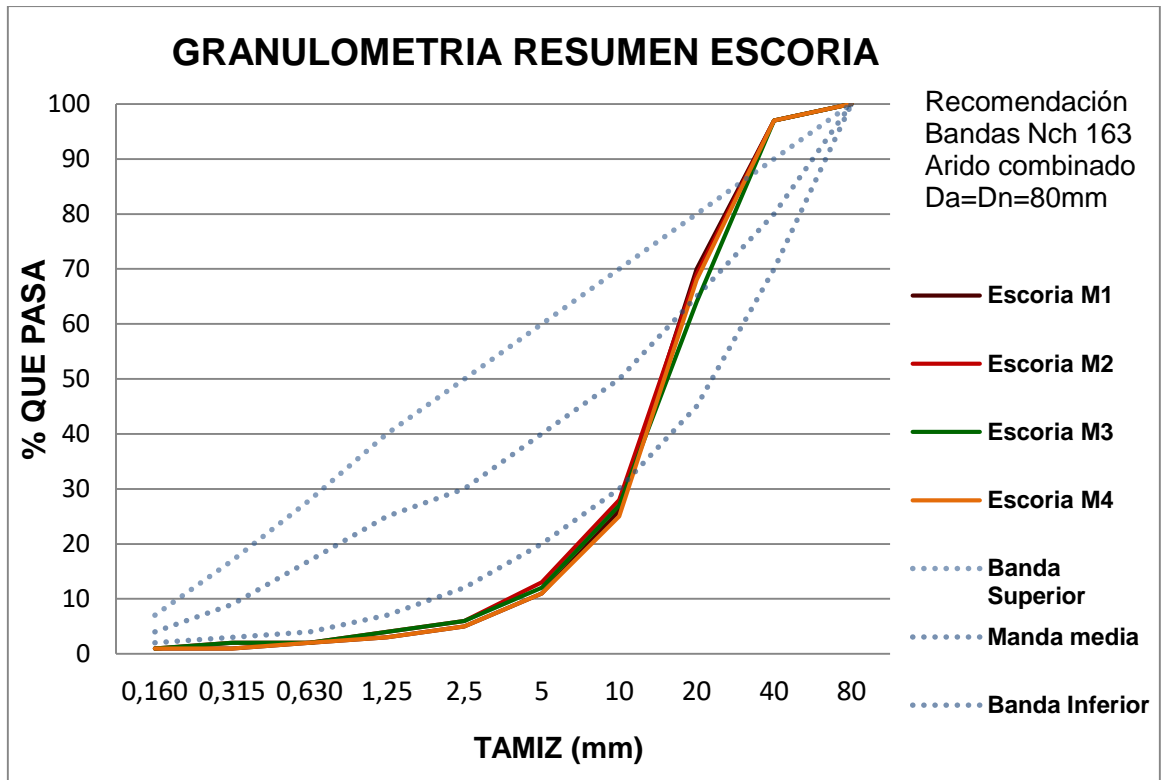


Figura 3.7: Resumen de granulometrías.

De la Figura 3.7 podemos concluir que estamos en presencia de un árido con un tamaño máximo nominal de 40mm, en un depósito relativamente homogéneo, las curvas granulométricas siguen la misma tendencia, por lo tanto, el material presenta una distribución de tamaños sin diferencias significativas en cualquiera de los sectores de donde se obtenga.

Además podemos notar que considerando la escoria como un árido combinado con menos de un 15% de material fino y luego de realizar las granulometrías correspondientes, esta no cumple con la distribución de tamaños sugerida en la norma NCh163. Of79, por lo que se debe realizar un proceso de selección y tamizado de la escoria para que esta cumpla con las exigencias de la norma y pueda ser utilizada en hormigones.



Figura 3.8: Distribución de tamaños Escoria de cobre Fundición Ventanas.

Luego de obtener la información granulométrica necesaria para descartar diferencias de distribución de tamaño entre las muestras, se procedió a reunir todo el material, para luego realizar la separación de este según tamaño grueso y fino respectivamente.

De acuerdo a la norma NCh163.Of79 “Áridos para morteros y hormigones – Requisitos generales”, se define como árido grueso aquel retenido por el tamiz 5mm, y árido fino el que pasa por el tamiz 5mm y es retenido en 0,080mm.

3.4 Ensayos de caracterización

3.4.1 Ensayos a material grueso de escoria

3.4.1.1 Granulometría:

Procedimiento según NCh165. Of77 “Áridos para morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría”.

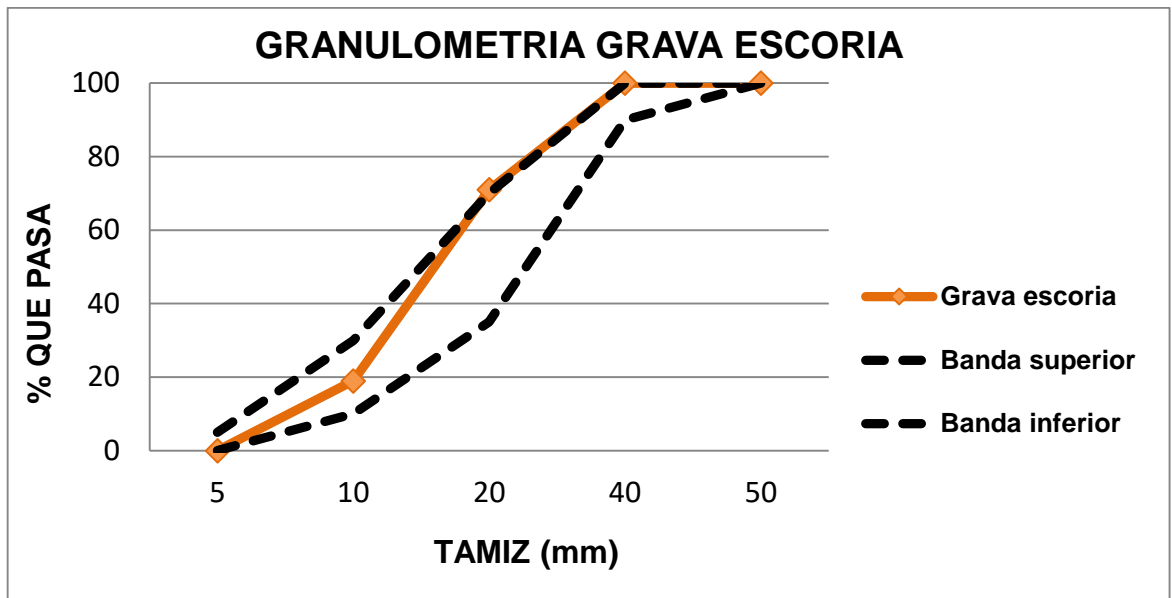


Figura 3.9: Granulometría promedio de la grava escoria.

La figura 3.9 representa la curva granulométrica de la grava de escoria, la cual cumple con lo requerido por la norma NCh163. Of79, en cuanto a la distribución de tamaños recomendada.

3.4.1.2 Desgaste Los Ángeles:

Procedimiento según NCh1369. Of78 “Áridos para hormigón – Determinación del desgaste de las gravas método máquina de los ángeles”

El método consistió en analizar granulométricamente el árido grueso, para preparar una muestra de ensayo que fue sometida a abrasión en la máquina de *Los Ángeles* para luego expresar la pérdida de material o desgaste como el porcentaje de pérdida de masa de la muestra con respecto a su masa inicial.



Figura 3.10: Instrumento para desgaste de áridos.
(Desgaste de áridos de los Ángeles)

El tamaño de la muestra para el ensayo viene determinado por la siguiente fórmula, siendo D_n el tamaño máximo nominal en mm de la escoria el cual es de 40 mm:

$$\text{Tamaño de muestra} \geq 2 * D_n \text{ (kg)}$$

$$\text{Tamaño de muestra} \geq 2 * 40 \text{ (kg)}$$

$$\text{Tamaño de muestra} \geq \mathbf{80 \text{ (kg)}}$$

Se procede a lavar y secar la muestra a temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$, como ya se obtuvo previamente la información granulométrica de la grava 40-5 de escoria se realiza la elección del grado de ensayo que sea más representativo a la distribución de tamaños del árido, el cual se definió en *grado 4*.

Luego se toman 1250 ± 25 (gr) de cada tamaño retenido desde 40mm hasta 10mm, según el grado escogido, lo anterior queda definido por la siguiente tabla:

Tabla 3.3: Grados de ensayo (Definidos por sus tamaños límites en mm)

Tamaños de partículas (mm)	1	2	3	4	5	6	7
	(80 – 40)	(50 – 25)	(40 – 20)	(40 – 10)	(20 – 10)	(10 – 5)	(5 – 2,5)
	Tamaño de las fracciones (g)						
80-63	2 500 ± 50						
63-50	2 500 ± 50						
50-40	5 000 ± 50	5 000 ± 50					
40-25		5 000 ± 50	5 000 ± 25	1 250 ± 25			
25-20			5 000 ± 25	1 250 ± 25			
20-12,5				1 250 ± 25	2 500 ± 10		
12,5-10				1 250 ± 25	2 500 ± 10		
10-6,3						2 500 ± 10	
6,3-5						2 500 ± 10	
5-2,5							5 000 ± 10
Masa inicial (mi)	10 000 ± 100	10 000 ± 75	10 000 ± 50	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10
Esferas: - número - masa (g)	12			12	11	8	6
	5 000 ± 25			5 000 ± 25	4 584 ± 25	3 330 ± 25	2 500 ± 15
Número de revoluciones	1 000				500		

Fuente: Nch1369.Of78

Procedimiento del ensayo:

- Se pesaron los tamaños de las fracciones correspondientes al grado elegido, según tabla 3.2, se registró la masa inicial a ensayar como (mi), aproximado a 1g.
- Se ingresó (mi) a la máquina de desgaste, con 12 esferas y se programó a 500 revoluciones según tabla 3.2.
- Se extrajo el material cuidando de evitar pérdidas y contaminaciones, separando la carga abrasiva.
- La norma nos dice que se debe efectuar un primer tamizado en un tamiz de 2.5mm o superior, con lo que se procedió a realizar un primer tamizado en 4.75mm (tamiz n°4).

- Luego se realiza un tamizado manual de lo que pasa por un tamiz de 1,18mm debido a la falta del tamiz 1,6mm que indica la norma.



Figura 3.11: Tamices para ensayo “Desgaste de los Ángeles”.

- Se reunió el material retenido en ambos tamices, se lavó y seco a masa constante con una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ y se dejó enfriar a temperatura ambiente.
- Se pesó y registro la masa del material retenido como masa final de la muestra (mf), aproximado a 1g.
- Se calculó el desgaste de la grava de escoria como el porcentaje de pérdida de masa de la muestra de acuerdo a la formula siguiente, aproximado a 0,1%:

$$P = \frac{mi - mf}{mi} \times 100\%$$

En que:

P = Pérdida de masa de la muestra, %.

mi = Masa inicial de la muestra, g.

mf = Masa final de la muestra, g.

Tabla 3.4: Resultado desgaste de la grava escoria método “Desgaste de los Ángeles”

Desgaste de la grava escoria método máquina de los ángeles			
<i>MUESTRA</i>	<i>Peso muestra inicial (mi)</i>	<i>Peso muestra final (mf)</i>	<i>Pérdida de masa de la muestra (P)</i>
	grs	grs	%
Muestra 1	5007	4044	19,2

Fuente: Elaboración propia.

La norma NCh163. Of79 nos establece máximos porcentajes de desgaste para las gravas en hormigones, esta nos dice que para un hormigón sometido a desgaste, la grava no puede superar un 40% en este ensayo, además para todo hormigón nos da un límite de 50%. Podemos notar que la escoria de cobre presenta un buen comportamiento frente al desgaste, siendo un 19% muy inferior a los límites máximos de la norma para una grava en hormigón.

3.4.1.3 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.Of77 Áridos para morteros y hormigones – “Determinación de las densidades real y neta de la absorción de agua de las gravas”. El resultado de este ensayo se presenta en la tabla 3.5.

3.4.1.4 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”. El resultado de este procedimiento se presenta en la tabla 3.5.

3.4.2 Ensayos a material fino de escoria

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

3.4.2.1 Granulometría:

Procedimiento según NCh165. Of77 “Áridos para morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría”.

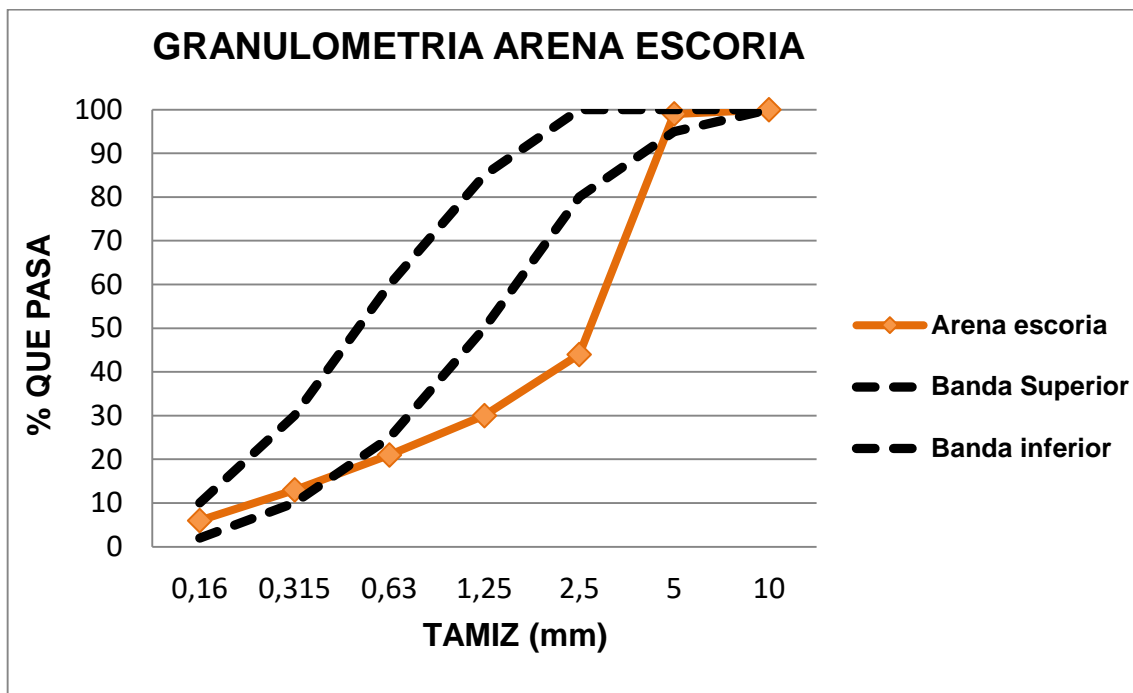


Figura 3.12: Granulometría promedio de la arena escoria.

La figura 3.12 nos muestra claramente como la arena de escoria no cumple con lo requerido por la norma NCh163. Of79, en cuanto a la distribución de tamaños recomendada. A pesar de esta situación, la presente norma nos 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.

3.4.2.2 Material menor que 0,080mm:

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.

Tabla 3.5: Contenido de material fino menor a 0,080mm (%).

Material fino menor a 0,080mm (%)				
<i>MUESTRA</i>	<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	%
Muestra 1	853,6	812,1	41,5	4,9
Muestra 2	841,7	803,3	38,4	4,6
Muestra 3	862,1	821,2	40,9	4,7
PROMEDIO	852,5	812,2	40,3	4,7

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 3.3 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. Of79, 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%.

3.4.2.3 Determinación de las densidades real y neta y absorción de agua de la arena escoria:

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. El resultado se presenta en la tabla 3.5.

3.4.2.4 Determinación de la densidad aparente de la arena escoria:

Para la densidad aparente se recurrió a la NCh1116.Of77 Áridos para morteros y hormigones – “Determinación de la densidad aparente”. Presentación de resultado en tabla 3.5.

La tabla 3.5 presenta un resumen de las características físicas en cuanto a densidades y absorción de agua de la escoria, de acuerdo a los ensayos antes definidos para su determinación, en material grueso (grava) y fino (arena) respectivamente:

Tabla 3.6: Resumen de características físicas de la escoria

Determinación	Unidad	Grava Escoria	Arena Escoria
Densidad aparente suelta	kg/m ³	2136	3653
Densidad aparente compactada	kg/m ³	2326	3763
Densidad real árido seco	kg/m ³	3789	3861
Densidad real árido sss	kg/m ³	3797	3871
Densidad neta	kg/m ³	3819	3901
Absorción de agua	%	0,20	0,27

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la tabla resumen 3.5, la escoria de cobre presenta densidades notablemente superiores a un árido convencional, en su condición sss presenta una densidad 34% mayor a una grava convencional 40/20 utilizada en la presente investigación. (Ver resumen de características físicas de áridos convencionales Tabla 3.6)

También se puede notar una absorción de agua baja en relación a un árido convencional, presentando 1.1 puntos porcentuales menos de absorción que la grava 40/20 convencional utilizada en esta investigación (Ver Tabla 3.6). La Nch163.Of79 nos presenta límites para esta absorción, siendo un máximo de 2% para gravas y 3% para las arenas, en el caso de la escoria analizada no alcanza el 0,3% en ninguno de sus tamaños. Se presume que esto es producto de la elevada densidad, la cual no permite que el agua penetre a los poros interiores del material y los llene.

3.4.3 Ensayos a árido convencional

3.4.3.1 Granulometría:

Procedimiento según NCh165. Of77 "Áridos para morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría".

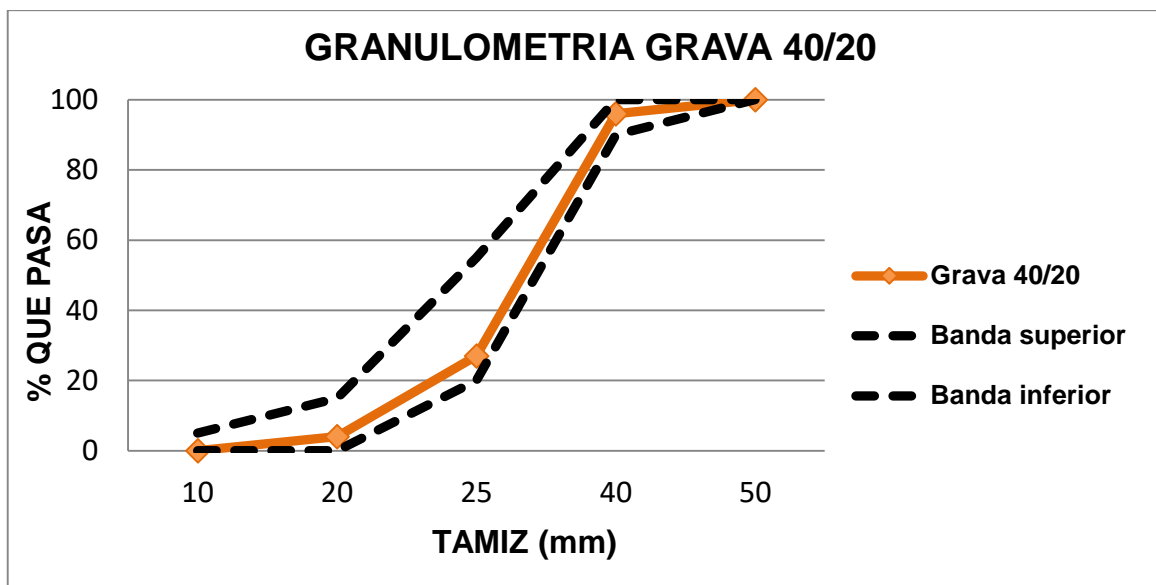


Figura 3.13: Granulometría promedio de la grava 40/20.

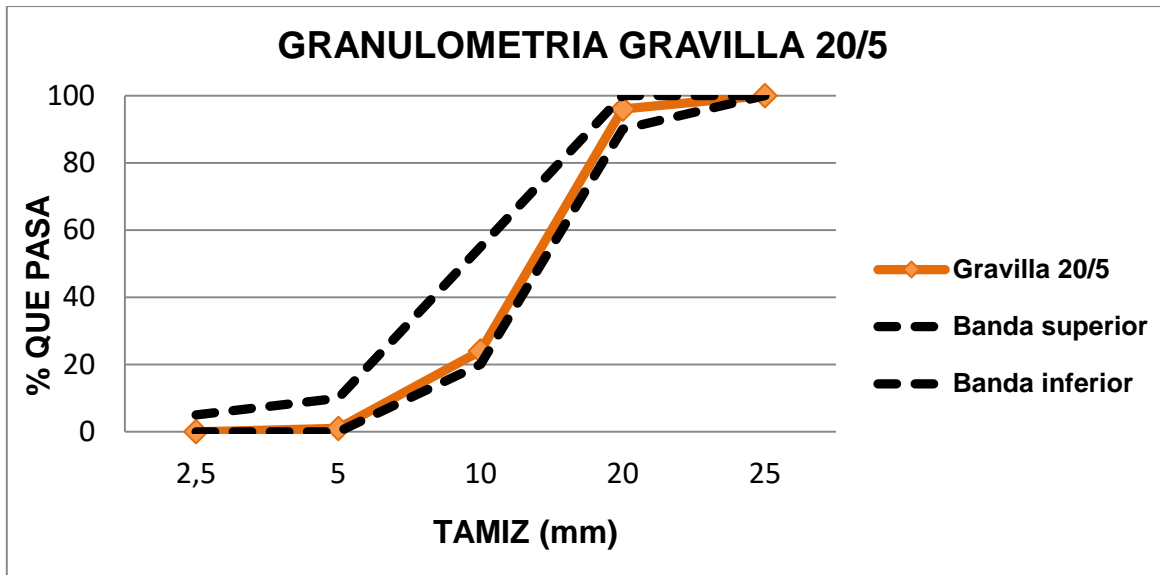


Figura 3.14: Granulometría promedio de la grava 20/5.

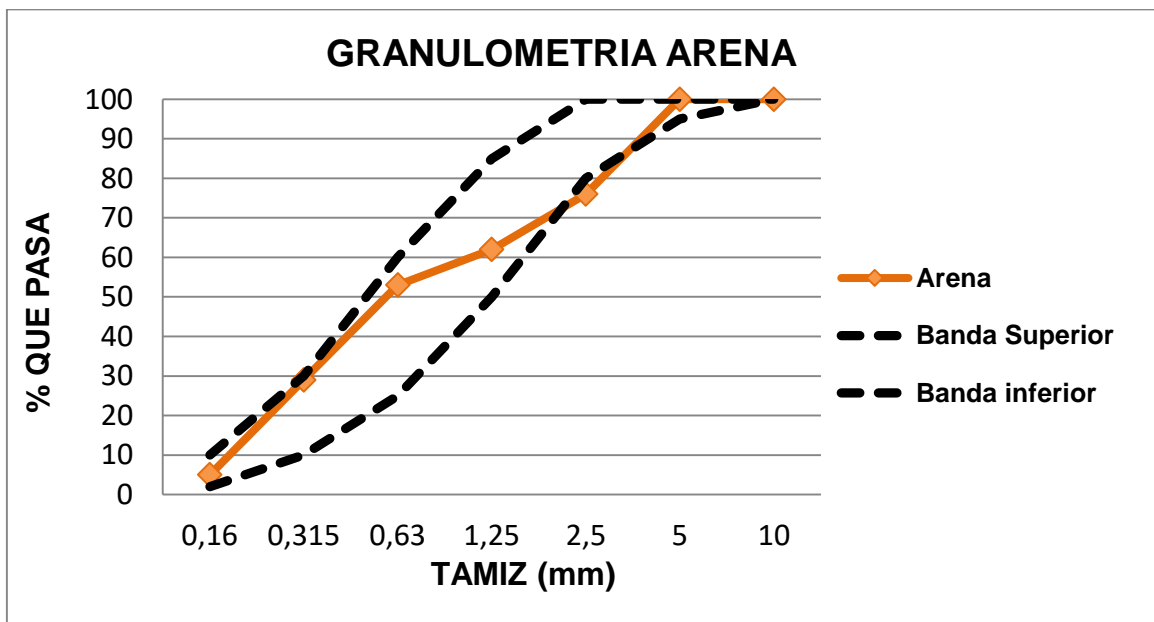


Figura 3.15: Granulometría promedio de la arena convencional.

De las Figuras 3.13, 3.14 y 3.15 se puede apreciar que el árido convencional cumple con las disposiciones granulométricas dispuestas en la norma Nch163. Of79.

3.4.3.2 Determinación de las densidades real y neta y absorción de agua de la grava:

Para el procedimiento se utilizaron los parámetros entregados por la NCh1117.Of77 Áridos para morteros y hormigones – “Determinación de las densidades real y neta de la absorción de agua de las gravas”. Véase en la tabla 3.6 el resultado del ensayo.

3.4.3.3 Determinación de la densidad aparente de la grava y arena:

Para la densidad aparente se recurrió a la NCh1116. Of77 Áridos para morteros y hormigones – “Determinación de la densidad aparente”. El resultado de este ensayo se presenta en la tabla 3.6.

3.4.3.4 Determinación de las densidades real y neta y absorción de agua de la arena:

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. El resultado de este ensayo se presenta en la tabla 3.6 la cual 6 presenta un resumen de las características físicas en cuanto a densidades y absorción de agua de los áridos convencionales, de acuerdo a los ensayos anteriormente definidos:

Tabla 3.7: Resumen de características físicas del árido convencional.

Determinación	Unidad	Grava 40/20	Gravilla 20/5	Arena
Densidad aparente suelta	kg/m ³	1495	1515	1539
Densidad aparente compactada	kg/m ³	1636	1614	1711
Densidad real árido seco	kg/m ³	2713	2632	2445
Densidad real árido sss	kg/m ³	2750	2660	2486
Densidad neta	kg/m ³	2818	2707	2548
Absorción de agua	%	1,37	1,06	1,66

Fuente: Elaboración propia.

3.4.4 Granulometría de áridos combinados

Procedimiento según NCh165. Of77 “Áridos para morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría”. Las siguientes Figuras muestran gráficamente los resultados granulométricos para la combinación de áridos que se utilizarán en la presente investigación.

3.4.4.1 Granulometría árido combinado Grava 40/20 – gravilla 20/5

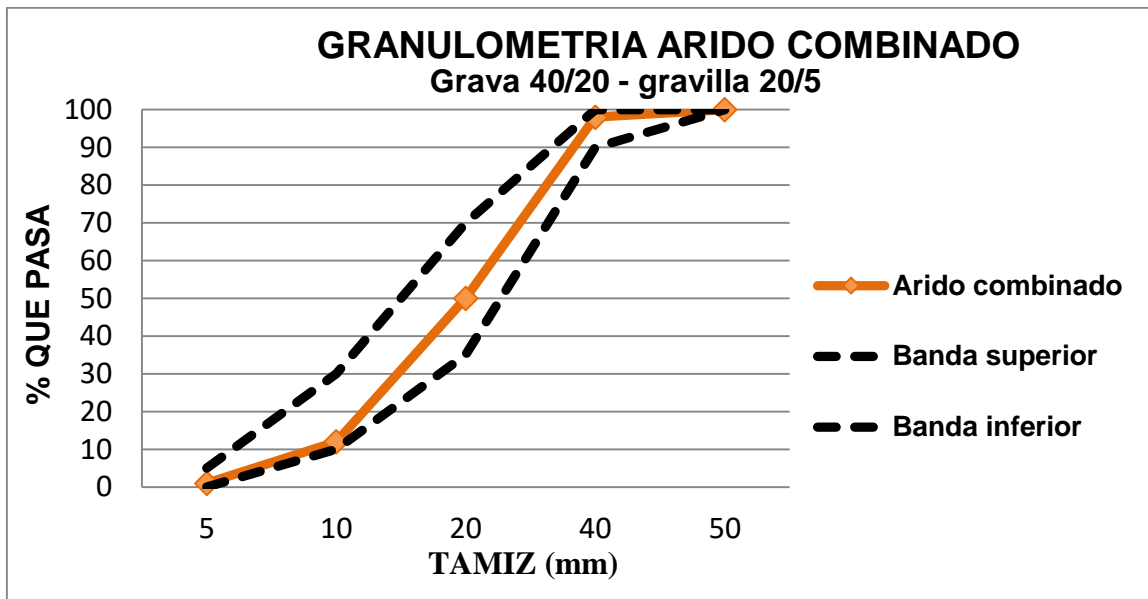


Figura 3.16: Granulometría árido combinado Grava 40/20 – gravilla 20/5.

3.4.4.2 Granulometría árido combinado Grava 40/5 – arena

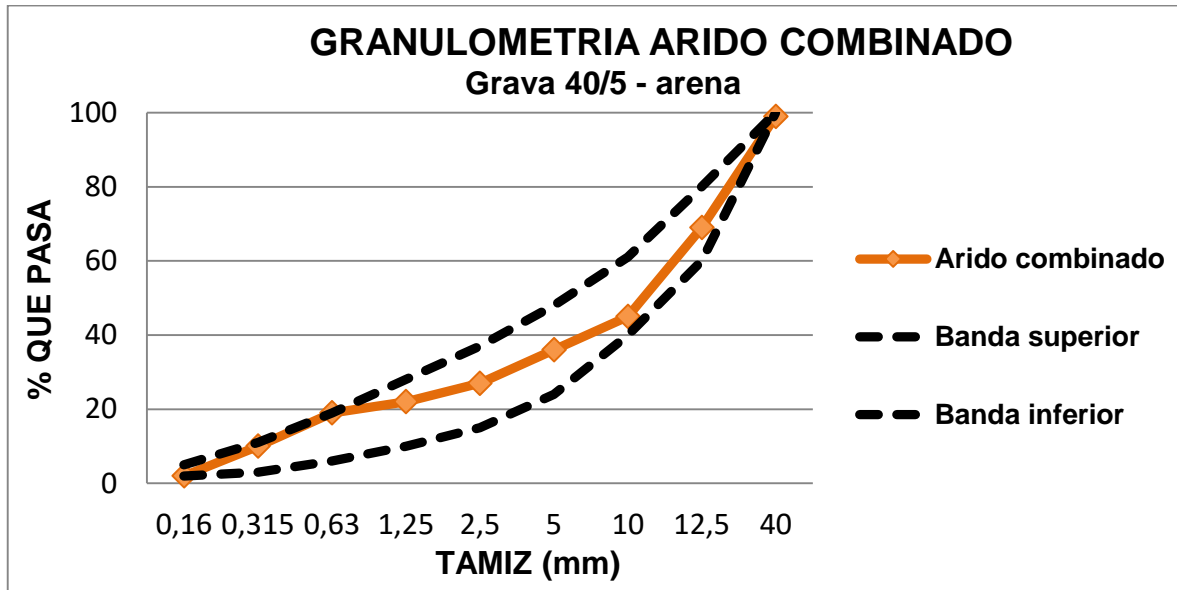


Figura 3.17: Granulometría árido combinado Grava 40/5 – arena.

3.4.4.1 Granulometría árido combinado Grava escoria 40/5 – arena convencional

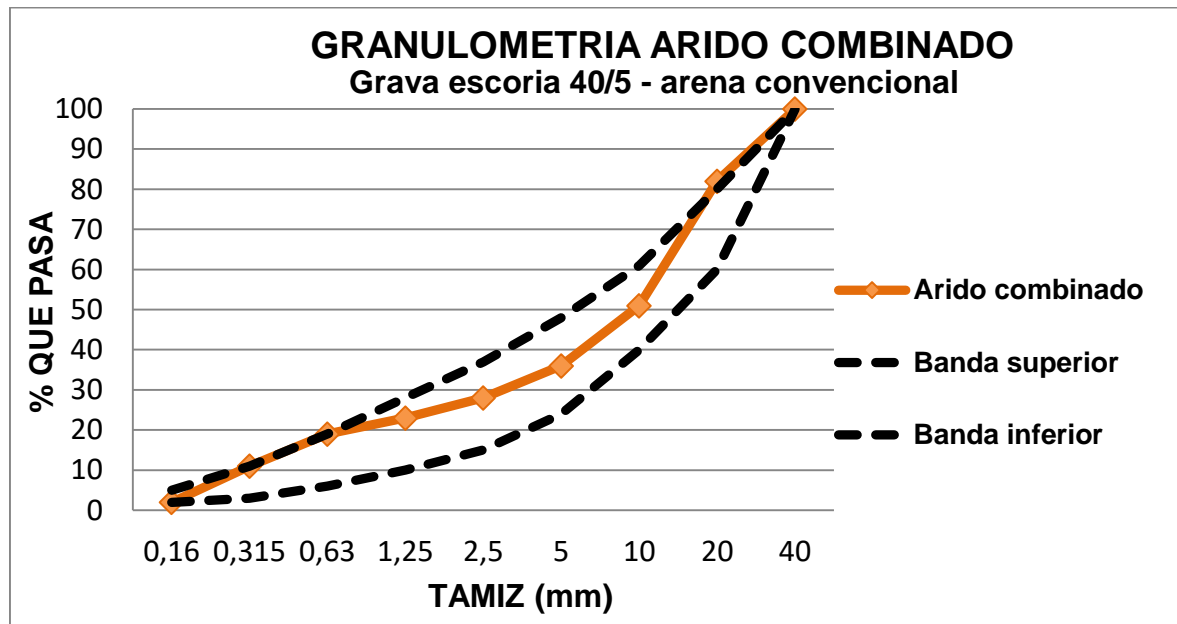


Figura 3.18: Granulometría árido combinado Grava escoria 40/5 – arena.

3.4.4.2 Granulometría árido combinado Arena escoria – arena convencional

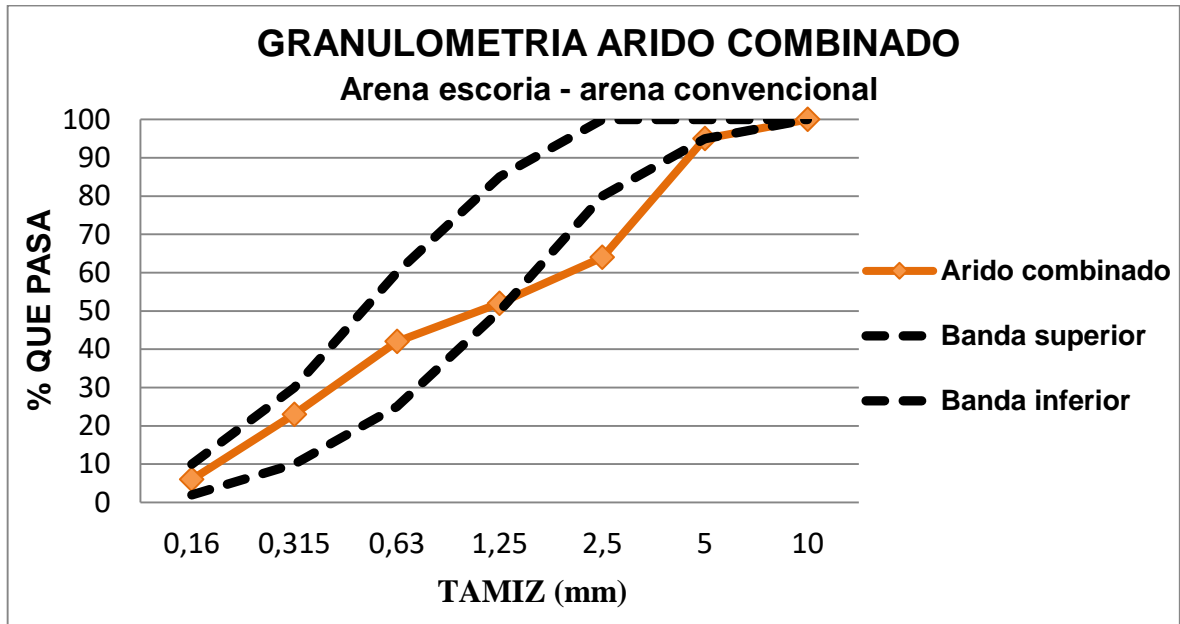


Figura 3.18: Granulometría árido combinado Arena escoria – arena convencional.

3.4.4.1 Granulometría árido combinado Grava escoria 40/5 – (arena escoria + arena convencional)

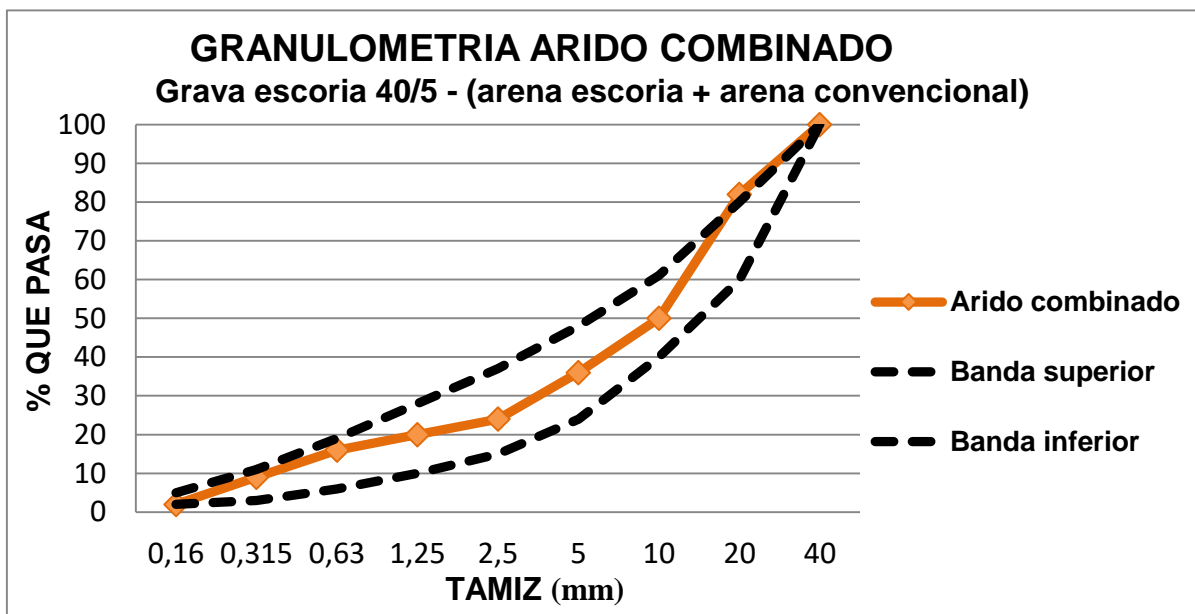


Figura 3.19: Granulometría árido combinado Grava escoria 40/5 – (arena escoria + arena convencional).

De las Figuras 3.16, 3.17 y 3.19 se puede apreciar que estos áridos combinados cumplen con las exigencias granulométricas dispuestas en la norma Nch163. Of79, a excepción de la Figura 3.18, la cual presenta la mezcla entre una arena de escoria y arena convencional, esta banda combinada escapa en uno de sus puntos por debajo del límite inferior impuesto por la norma, esto se explica apreciando la Figura 3.12, la cual nos indica que la arena de escoria no presenta la distribución granulométrica adecuada según la norma Nch163. Of79. A pesar de esta situación, la presente norma nos indica que la mezcla de arenas puede ser utilizada siempre y cuando cumpla con los requisitos de las especificaciones de la obra.

3.5 Planteamiento de la experiencia

3.5.1 Factorial de ensayos

Según los alcances planteados y las características del estudio, el diseño factorial considera tres mezclas, dos de ellas con reemplazos de escoria de cobre por árido convencional, más una mezcla con áridos convencionales llamada “patrón”.

Tabla 3.8: Factorial de ensayos

Mezclas	Mezcla A	Mezcla B	Mezcla P
Hormigón	Grava de escoria + mezcla arena (escoria + convencional)	Grava de escoria + arena convencional	Grava convencional + arena convencional (Patrón)
Nomenclatura	GE + A(E+C)	GE + AC	GC + AC
Tipo de cemento	Portland puzolanico	Portland puzolanico	Portland puzolanico
Tiempo de curado	28 días	28 días	28 días
Ensayo	Fc, Ft	Fc, Ft	Fc, Ft

Fuente: Elaboración propia.

Nomenclatura de ensayos:

- Fc: Resistencia a la compresión
- Ft: Resistencia a la flexo-tracción

Como se puede apreciar en la tabla 3.6, todos los ensayos se realizaron a los 28 días, además todas las mezclas fueron sometidas a los ensayos de compresión y flexo- tracción respectivamente.

3.5.2 Dosificación

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.Of85 – “Hormigón - Requisitos generales”.

Para la dosificación de hormigones primero es necesario conocer la proporción de los áridos para cada mezcla, es decir, la cantidad de grava y de arena a utilizar como un total de árido combinado, para esto se consideran los porcentajes que pasa por una malla en común aplicado a la banda granulométrica de la norma Nch163.Of79, este método es conocido como “condición impuesta” en el método IDIEM, a continuación se muestra el desarrollo para el hormigón patrón:

- Mezcla P: Grava 40/20 (G), grava 20/5 (M) y Arena (A).

Malla común: 20mm

Banda promedio según recomendación Nch163: $(35+70) / 2 = 53$

$$4G + 96M = 53(G + M)$$

$$49G - 43M = 0$$

$$G = 43/(49 + 43) = 0,5 ; M = 0,5$$

Obteniendo un 50% de grava 40/20 y un 50% de grava 20/5, nos queda determinar el porcentaje de arena, a continuación el cálculo:

Mezcla P: Grava 40/5 (GM) y Arena (A)

Malla común: 5mm

Banda promedio según recomendación Nch163: $(24+48) / 2 = 36$

$$1GM + 93A = 36 (GM + A)$$

$$57A - 35GM = 0$$

$$A = 35/(57+35) = 0,38; GM = 0,62$$

Con esto finalmente se obtiene una proporción de árido total siguiente: 31% de grava 40/20, 31% gravilla 20/5 y un 38% de arena, esto para el hormigón patrón, a continuación se presentan las proporciones de áridos para las demás mezclas, resultados obtenidos efectuando el mismo procedimiento anterior.

- Mezcla A: Grava de escoria (GE) + arena escoria (AE) + arena convencional (AC)
Proporciones árido total: 62 % GE – 10 % AE – 28 % AC.
- Mezcla B: Grava de escoria (GE) + arena convencional (AC)
Proporciones árido total: 61 % GE – 39 % AC.

Ahora se procede a determinar un peso estimado de hormigón en kg/m³, según sus condiciones de uso y tamaño máximo nominal, en este caso para un hormigón armado en general y un máximo nominal 40mm, nos arroja un peso estimado de 2450 kg/m³, todo esto según la tabla 3 del método IDIEM.

A continuación debemos determinar la dosis de cemento, la cual se estableció en el valor de 340kg/m³. Con esta dosis de cemento podemos elegir el agua de amasado la cual para un tamaño máximo nominal 40mm se obtienen 182kg/m³ de agua, todo esto según la tabla 5 del método IDIEM.

Con estos datos y efectuando las correcciones volumétricas correspondientes, debido a la diferencia de densidades de cada material, se estuvo en condiciones de dosificar el hormigón para 1m³, el resumen de estas dosificaciones se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3.9: Resumen dosificaciones corregidas para 1 m³ de hormigón.

Materiales	Mezcla A	Mezcla B	Mezcla P
	GE + A(E+C)	GE + AC	GC + AC
	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³
Cemento	340	340	340
Agua	182	182	182
GE(40/5)	1430	1334	0
AE	232	0	0
G(40/20)	0	0	547
M(20/5)	0	0	548
AC	609	818	675
Total	2793	2674	2292

Fuente: Elaboración propia.

3.5.3 Dosificación por colada

Para la dosificación de cada colada se procedió a determinar la cantidad de litros totales por cada mezcla según el siguiente criterio:

1 probeta cubica: $15 \times 15 \times 15 = 3375 \text{ cm}^3 = 3,5 \text{ lts} \times 3 = 10,5 \text{ lts}$

1 probeta tipo viga: $15 \times 15 \times 53 = 11925 \text{ cm}^3 = 12 \text{ lts} \times 3 = 40,5 \text{ lts}$

$10,5 + 40,5 = 51 \text{ lts} + (15\% \text{ de perdidas})$

Litros totales aproximados por colada = 60 litros.

Tabla 3.10: Dosificaciones para una colada (0,06m³).

Materiales (Kg)	Mezcla A	Mezcla B	Mezcla P
	GE + A(E+C)	GE + AC	GC + AC
	0,06 m ³	0,06 m ³	0,06 m ³
Cemento	20,4	20,4	20,4
Agua	11	11	11
GE	85,8	80	0
AE	13,9	0	0
G(40/20)	0	0	32,8
M(20/5)	0	0	32,9
AC	36,8	49,1	40,5
Total	167,9	160,6	137,6

Fuente: Elaboración propia

El resumen de dosificaciones teóricas, corregidas y para una colada, se puede encontrar en el Anexo 6.

3.5.4 Fabricación de hormigones

La fabricación de los hormigones se lleva a cabo en los Laboratorios de Hormigón de la Universidad de Valparaíso, en donde se utilizarán los equipos y herramientas disponibles para la correcta confección de las probetas.

Cabe destacar que para la confección de hormigones es de vital importancia considerar las condiciones de humedad de los áridos al momento del pesaje de los elementos componentes del hormigón, para así no alterar las dosificaciones teóricas. Así como también que los hormigones fabricados en la presente investigación cumplan a cabalidad todos los requerimientos especificados en las normas chilenas vigentes.

El procedimiento de trabajo fue el mismo para todos los hormigones.

- a) Según la dosificación teórica calculada se pesó cada material y se cargó en la betonera los áridos (arena, gravilla), escoria y cemento, según el tipo de hormigón a elaborar, revolviéndose en seco a pala para homogeneizar la mezcla de los materiales. Posteriormente se vertió el agua por 2 minutos para terminar el mezclado con otros 3 minutos.
- b) Una vez concluido el proceso de mezclado y fabricación del hormigón, se realizó una prueba de asentamiento tipo cono por cada mezcla o colada, para con esto determinar la docilidad de cada hormigón, y controlar un asentamiento estimado de 8 ± 2 cm, todo este procedimiento según la norma Nch1019.Of74, Figura 3.20.
- c) Luego se colocó el hormigón en las distintas probetas según el ensayo a efectuar, cuidando de realizar un vibrado adecuado y suficiente, además de previamente haber preparado las probetas cerciorándose que estuviesen bien armadas y pintadas con el respectivo desmoldante, figura 3.21.
- d) Para finalizar se dejaron secar las probetas por 24 ± 4 hrs, para proceder a desmoldar y dejar bajo agua iniciando el periodo de curado por 28 días.



Figura 3.20: Ensayo asentamiento de cono.

El procedimiento para realizar este ensayo fue realizado según la norma chilena Nch1019.Of74 – “Construcción- Hormigón – Determinación de la docilidad – Método del asentamiento del cono de Abrams”

Las mezclas tuvieron los siguientes resultados de asentamiento:

- Mezcla A = 8 cms
- Mezcla B = 9,5 cms
- Mezcla P (Patrón) = 11 cms

Estos resultados son consecuentes con el cono de asentamiento teórico esperado de 8 ± 2 cm.



Figura 3.21: Probetas luego del llenado.

3.5.5 Dimensión de las probetas

El tamaño de las probetas se consultó en función de los ensayos efectuados, por lo que se utilizaron dos dimensiones diferentes de probetas, las cuales se catalogan de la siguiente manera:

- Probetas cúbicas de 15 cm de arista. Estas probetas se emplean para los ensayos de compresión.

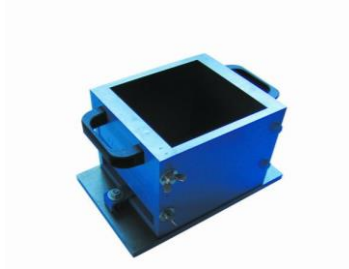


Figura 3.22: Probetas cúbicas.

- Vigas de 15x15x53 cm para ensayar a Flexo-tracción.



Figura 3.23: Probetas tipo viga.

3.5.6 Ensayo de resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión fue determinada a la edad de 28 días, luego de un proceso de curado descrito en 3.5.4.

Este ensayo fue llevado a cabo según las consideraciones de la norma chilena Nch1037.Of77 – “Hormigón – Ensayo de compresión a probetas cubicas y cilíndricas.”

La Figura 3.24 muestra la maquina utilizada para efectuar el ensayo a compresión de las probetas cubicas, se puede apreciar una probeta sometida a los esfuerzos respectivos.



Figura 3.24: Ensayo de compresión.

3.5.7 Ensayo de resistencia a la tracción por flexión

La resistencia a flexo-tracción fue determinada a la edad de 28 días, luego de un proceso de curado descrito en 3.5.4. Este ensayo fue llevado a cabo según las consideraciones de la norma chilena Nch1038. Of77 – “Hormigón - Ensayo de tracción por flexión.”

La Figura 3.25 muestra la maquina utilizada para efectuar el ensayo de las vigas a flexo-tracción, se puede apreciar una probeta sometida a los esfuerzos respectivos.



Figura 3.24: Ensayo de Tracción por flexión.



Figura 3.24: Viga luego del ensayo de tracción por flexión.

Capítulo 4: Presentación y Análisis de Resultados

4.1 Generalidades

En el presente capítulo se presentan y analizan los diferentes resultados obtenidos producto de la ejecución de las distintas experiencias de laboratorio descritas anteriormente en el programa experimental. Lo que se pretende es realizar una comparativa entre estos resultados, evaluando el comportamiento del hormigón patrón versus las mezclas con contenido de escoria en los ensayos de compresión y flexo-tracción respectivamente.

4.2 Resistencia a compresión

La Tabla 4.1 muestra los resultados obtenidos mediante los ensayos a compresión.

Tabla 4.1: Resultados resistencia a la compresión

Hormigón	Muestra	Carga de rotura (kgf)	Tensión de rotura (kgf/cm ²)	Promedio tensión de rotura (kgf/cm ²)	Desviación estandar	Variación respecto Patrón (%)
Mezcla A	1	57378	248,4	247,2	3,69	76
	2	56164	243,1			
	3	57795	250,2			
Mezcla B	1	71532	335,6	331,7	12,86	103
	2	67625	317,3			
	3	72924	342,1			
Mezcla P	1	68380	320,8	323,4	3,83	100
	2	68556	321,6			
	3	69875	327,8			

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4.1 presenta gráficamente las resistencias a compresión obtenidas en las distintas mezclas de interés.

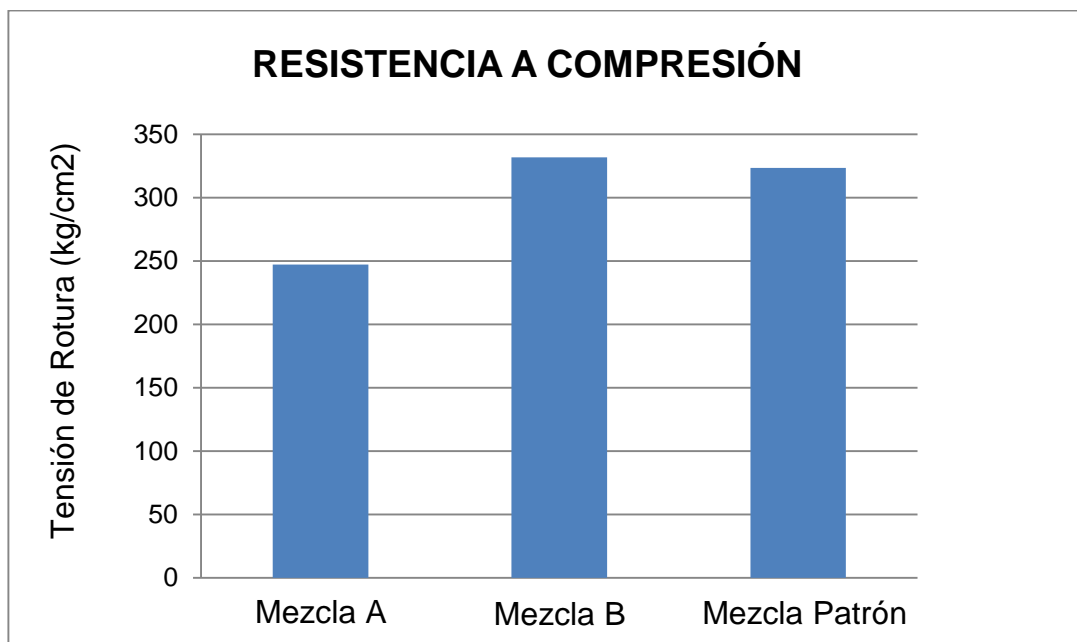


Figura 4.1: Resistencia a compresión.

De la Figura 4.1 podemos observar una significativa diferencia entre las resistencias de la mezcla A y mezcla P (Patrón), estando la primera por debajo de la mezcla patrón aproximadamente un 30%, en cambio la mezcla B no presenta diferencias relevantes respecto la mezcla patrón, estando solo un 3% por sobre esta.

Este comportamiento de una baja resistencia a la compresión presentado por la mezcla A respecto del hormigón patrón, presumiblemente se deba a su contenido de arena de escoria, precisamente esta mezcla es la única que posee este tipo de agregado y considerando su pésima distribución granulométrica respecto lo exigido por norma, y relativamente alto contenido de finos menores a 0,080mm, se plantea que provoca una disminución importante en su resistencia frente a la compresión.

La Tabla 4.2 nos muestra las densidades aparentes de las mezclas

Tabla 4.2: Resultados densidades aparentes

Hormigón	Muestra	Masa (kg)	Volumen (cm ³)	Densidad (kg/m ³)	Promedio de densidades (kg/m ³)	Desv. estándar	Variación respecto Patrón (%)
Mezcla A	1	9,764	3488,7	2798,8	2813,7	20,08	120
	2	9,766	3442,9	2836,6			
	3	9,789	3488,7	2805,9			
Mezcla B	1	9,615	3511,8	2737,9	2733,3	20,26	117
	2	9,521	3511,8	2711,1			
	3	9,597	3488,7	2750,9			
Mezcla P	1	8,166	3488,7	2340,7	2343,1	17,74	100
	2	8,171	3511,8	2326,7			
	3	8,132	3442,9	2362,0			

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4.2 presenta gráficamente los resultados de la medición de densidad aparente a los hormigones antes de ser sometidos al ensayo de compresión.

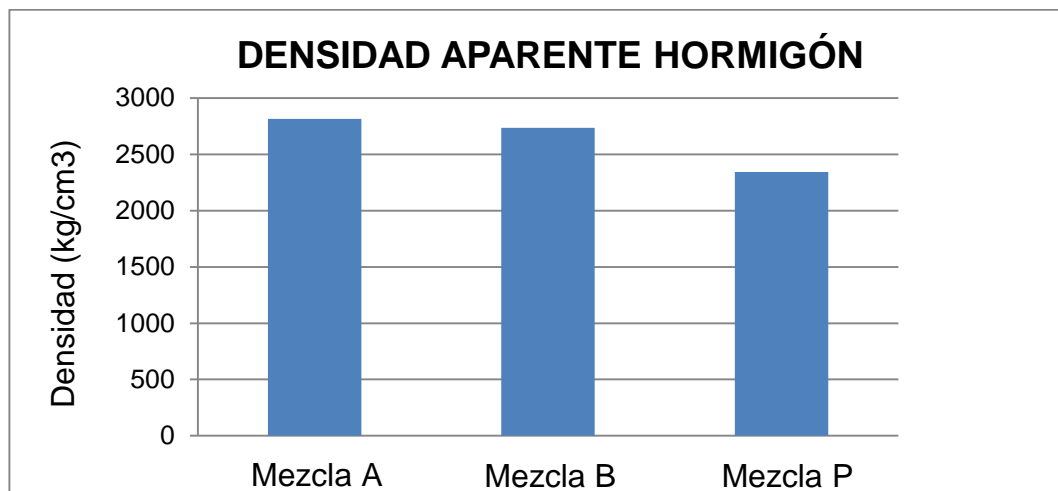


Figura 4.2: Densidades de los hormigones.

Se puede apreciar con claridad y como se esperaba, que a medida aumenta el contenido de escoria en las mezclas, aumenta también su densidad, esto se debe a la alta densidad que presenta la escoria, muy superior al árido convencional. La mezcla A, la cual posee la mayor cantidad de agregado del tipo escoria, tiene una densidad aproximada un 20% mayor respecto del hormigón patrón, mientras que la mezcla B presenta un aumento del 16%.

4.3 Resistencia a tracción por flexión

La Tabla 4.3 nos muestra los resultados de la resistencia a la tracción por flexión.

Tabla 4.2: Resultados resistencia a la tracción por flexión

Hormigón	Muestra	Carga de rotura (kgf)	Tensión de rotura (kgf/cm ²)	Promedio tensión de rotura (kgf/cm ²)	Desviación estándar	Variación respecto Patrón (%)
Mezcla A	1	181,5	23,3	24,8	2,87	82
	2	179,8	23,0			
	3	219,4	28,1			
Mezcla B	1	196,3	25,2	26,5	1,19	88
	2	214,3	27,5			
	3	209,4	26,8			
Mezcla P	1	236,6	30,3	30,1	1,59	100
	2	221,6	28,4			
	3	246,2	31,5			

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4.3 presenta gráficamente las resistencias a la tracción por flexión obtenidas en las diferentes mezclas estudiadas.

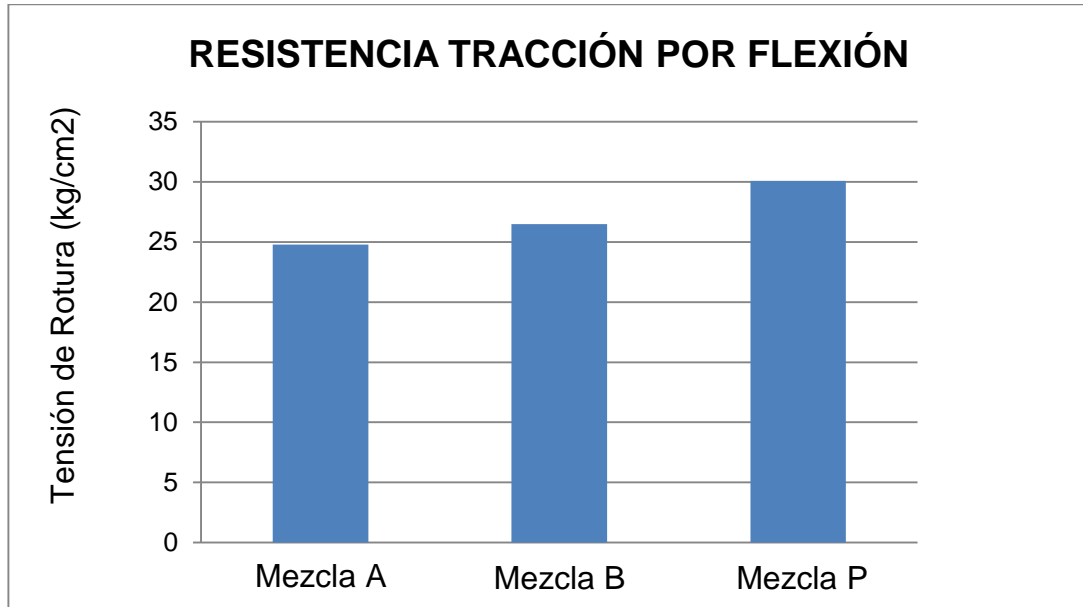


Figura 4.3: Resistencia tracción por flexión.

De la Figura 4.3 se puede concluir que el reemplazo de escoria de cobre por hormigón convencional no favorece el comportamiento de los hormigones en cuanto a su resistencia a la tracción por flexión, esto podría tener respuesta debido al posible descenso de la adherencia entre la pasta de cemento y el árido de escoria.

Capítulo 5: Conclusiones y Proposición de Futuras Investigaciones

6.1 Generalidades

En el presente capítulo se describen las conclusiones de mayor relevancia producto de la investigación, a partir del análisis de resultados. También se recomiendan futuras investigaciones para continuar el análisis de la escoria del depósito Fundición Ventanas.

6.2 Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos de los diferentes ensayos realizados en la presente investigación, además del análisis respectivo que involucró la interpretación de los mismos, se puede concluir lo siguiente:

- En relación a la homogeneidad del depósito, queda demostrado mediante el análisis de las muestras extraídas, que el depósito 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. Cabe destacar que prácticamente el depósito es aprovechable un 88% como grava para hormigones.
- Con respecto a los ensayos de caracterización granulométrica podemos decir que este material no presentaría problemas en cuanto a su distribución de tamaños, la cual cumple con las bandas exigidas por la norma chilena a excepción de la arena de escoria, la cual no presenta la distribución exigida.
- Las propiedades físicas de la escoria como lo son su densidad, absorción de agua, resistencia al desgaste y contenido de finos menores a 0,080mm, presentan características compatibles con la elaboración de hormigones, se debe destacar la alta densidad y baja absorción de agua.
- En la compresión la mezcla B, la cual está compuesta por grava de escoria y arena convencional, no presentó diferencias significativas con respecto un hormigón patrón de árido convencional, esta mezcla mostró una mejora de un 3% aproximadamente. Conviene descartar el uso de arena de escoria sin un tratamiento previo que mejore su distribución de tamaños.

- Frente a la tracción por flexión las mezclas con agregado de escoria presentaron una baja de la resistencia, la mezcla B bajó un 12% su resistencia respecto la mezcla P (patrón), esto podría deberse a una menor adherencia entre pasta-agregado de escoria, posiblemente causado por el alto contenido de finos menores a 0,080mm de la arena de escoria, y principalmente por la baja rugosidad del material, que tiene directa relación con su baja absorción de agua y alta densidad.

Finalmente podemos concluir que la presente investigación es consecuente con la hipótesis inicial en relación a los siguientes puntos:

- Presenta características apropiadas y consecuentes con las normas vigentes para la confección de hormigones.
- Es homogénea en su distribución granulométrica a lo largo de todo el depósito.

Con respecto a la muestra de mejoras en su resistencia a la Compresión y Flexo-tracción cabe destacar lo siguiente:

- En la compresión no presenta diferencias significativas con un hormigón patrón confeccionado con árido convencional.
- En la Flexo-tracción presenta una baja en su resistencia de un 12% respecto el patrón, por lo tanto no cumple con lo esperado.

6.3 Proposición de futuras investigaciones

A continuación se presentan algunas recomendaciones para posibles futuras investigaciones.

- Se propone realizar un estudio de hormigones confeccionados con arena de escoria seleccionada y previamente sometida a una mejora de su distribución granulométrica con algún método a convenir.
- Realizar la presente investigación agregando como variable de estudio un tiempo de curado mayor y porcentajes de reemplazo intermedios, para con esto determinar la cantidad de agregado escoria más conveniente y cómo se comportaría ante tiempos de curado mayores.
- Estudiar el comportamiento de la grava de escoria:
 - a) En hormigones de diferentes niveles de resistencia (H20, H50, H60)
 - b) En hormigones con Dn 20mm
- Evaluar el efecto de la grava de escoria sobre la absorción, permeabilidad y retracción hidráulica del hormigón.

BIBLIOGRAFÍA

- A. NAZER, O. PAVEZ, C. AGUILAR, 2010. Una revisión a los usos de las Escorias de cobre. Iberomet XI. Viña del Mar, Chile.
- CENDOYA P., 2009. Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería, Vol. 17 N°1. Efecto en la resistencia de las escorias de Fundición de cobre como agregado fino en el comportamiento resistente del hormigón. Concepción, Chile.
- CIFUENTES C., CORTÉS R., SOLÍS R., HERRERA J., TORRES N., SOLÍS C., 2013. Compendio de la Minería Chilena. Vigésima Sexta versión. Editorial EDITEC S.A. Santiago, Chile.
- COCHILCO, 2004. Informes sobre producción mundial de cobre refinado. Comisión Chilena del Cobre. Chile
- COCHILCO, 2014. Informe de Tendencias del Mercado del Cobre Enero - Marzo 2014
- COMISIÓN NACIONAL DE ÁRIDOS, 2001. Industria del Árido en Chile, Tomo II: Régimen Legal. Corporación de Desarrollo Tecnológico CDT. Santiago, Chile.
- COMISIÓN NACIONAL DE ÁRIDOS, 2001. Industria del Árido en Chile, Tomo I: Sintonización de Antecedentes Técnicos y Ambientales. Corporación de Desarrollo Tecnológico CDT. Santiago, Chile.
- NCh 165.Of77. Áridos para morteros y hormigones – Tamizados y determinación de la granulometría. Instituto de Normalización. Chile.
- ORIZOLA S., 2006. Uso de escoria de cobre en cementos. Tesis (Título de ingeniero civil). Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago, Chile.

- POBLETE J., GAJARDO A., OLIVARES R., NAZARALA M., CARRASCO R., ARIAS C., CAMPOS J., GREIG J., JARA J., PADILLA M., ZUÑIGA E., 2011. Anuario de la Minería de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería SERNAGEOMIN. Ministerio de Minería, Gobierno de Chile.
- SEPÚLVEDA C., 2006. Utilización de escorias de fundición para la producción de compuestos de hierro. Tesis (Título de Ingeniero Civil Químico). Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago, Chile.

ANEXOS

Anexo 1: Datos granulométricos de muestras de Escoria.

Granulometría Escoria M1:

Muestra N° 1 de M1					
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>
80 mm.	3"	0	0,00	0,0	100
63 mm.	2 1/2"	0	0,00	0,0	100
50 mm.	2"	0	0,00	0,0	100
40 mm.	1 1/2"	808	3,10	3,1	97
25 mm.	1"	2140	8,22	11,3	89
20 mm.	3/4"	5270	20,25	31,6	68
12,5mm	1/2"	7980	30,67	62,2	38
10 mm.	3/8"	3818	14,67	76,9	23
5 mm.	N° 4	3547	13,63	90,5	9
2,5mm	N° 8	1180	4,53	95,1	5
1,25mm	N° 16	453	1,74	96,8	3
0,630mm	N° 30	249	0,96	97,8	2
0,315mm	N° 50	206	0,79	98,6	1
0,160mm	N° 100	179	0,69	99,3	1
Residuo		193	0,74	100,0	0
TOTAL		26023	100,0		

Muestra N° 2 de M1					
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>
80 mm.	3"	0	0,00	0,0	100
63 mm.	2 1/2"	0	0,00	0,0	100
50 mm.	2"	0	0,00	0,0	100
40 mm.	1 1/2"	627	2,48	2,5	98
25 mm.	1"	2047	8,10	10,6	89
20 mm.	3/4"	4832	19,11	29,7	70
12,5mm	1/2"	6938	27,44	57,1	43
10 mm.	3/8"	3661	14,48	71,6	28
5 mm.	N° 4	3758	14,86	86,5	14
2,5mm	N° 8	1723	6,81	93,3	7
1,25mm	N° 16	735	2,91	96,2	4
0,630mm	N° 30	355	1,40	97,6	2
0,315mm	N° 50	228	0,90	98,5	2
0,160mm	N° 100	152	0,60	99,1	1
Residuo		228	0,90	100,0	0
TOTAL		25284	100,0		

Muestra N° 3 de M1					
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>
80 mm.	3"	0	0,00	0,0	100
63 mm.	2 1/2"	0	0,00	0,0	100
50 mm.	2"	0	0,00	0,0	100
40 mm.	1 1/2"	562	2,21	2,2	98
25 mm.	1"	2563	10,06	12,3	88
20 mm.	3/4"	4313	16,93	29,2	71
12,5mm	1/2"	7615	29,89	59,1	41
10 mm.	3/8"	3649	14,32	73,4	27
5 mm.	N° 4	4177	16,39	89,8	10
2,5mm	N° 8	1431	5,62	95,4	5
1,25mm	N° 16	412	1,62	97,0	3
0,630mm	N° 30	215	0,84	97,9	2
0,315mm	N° 50	196	0,77	98,6	1
0,160mm	N° 100	167	0,66	99,3	1
Residuo		181	0,71	100,0	0
TOTAL		25481	100,0		

Muestra Promedio de M1					
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>
80 mm.	3"	0	0,00	0,0	100
63 mm.	2 1/2"	0	0,00	0,0	100
50 mm.	2"	0	0,00	0,0	100
40 mm.	1 1/2"	666	2,60	2,6	97
25 mm.	1"	2250	8,79	11,4	89
20 mm.	3/4"	4805	18,77	30,2	70
12,5mm	1/2"	7511	29,34	59,5	40
10 mm.	3/8"	3709	14,49	74,0	26
5 mm.	N° 4	3827	14,95	89,0	11
2,5mm	N° 8	1445	5,64	94,6	5
1,25mm	N° 16	533	2,08	96,7	3
0,630mm	N° 30	273	1,07	97,7	2
0,315mm	N° 50	210	0,82	98,6	1
0,160mm	N° 100	166	0,65	99,2	1
Residuo		201	0,78	100,0	0
TOTAL		25596	100,0		

Granulometría Escoria M2:

Muestra N° 1 de M2					
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>
80 mm.	3"	0	0,00	0,0	100
63 mm.	2 1/2"	0	0,00	0,0	100
50 mm.	2"	0	0,00	0,0	100
40 mm.	1 1/2"	732	2,86	2,9	97
25 mm.	1"	2280	8,90	11,8	88
20 mm.	3/4"	4927	19,23	31,0	69
12,5mm	1/2"	6630	25,88	56,9	43
10 mm.	3/8"	3710	14,48	71,4	29
5 mm.	N° 4	3862	15,08	86,4	14
2,5mm	N° 8	1802	7,03	93,5	7
1,25mm	N° 16	743	2,90	96,4	4
0,630mm	N° 30	314	1,23	97,6	2
0,315mm	N° 50	232	0,91	98,5	1
0,160mm	N° 100	164	0,64	99,1	1
Residuo		220	0,86	100,0	0
TOTAL		25616	100,0		

Muestra N° 2 de M2					
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>
80 mm.	3"	0	0,00	0,0	100
63 mm.	2 1/2"	0	0,00	0,0	100
50 mm.	2"	0	0,00	0,0	100
40 mm.	1 1/2"	724	2,87	2,9	97
25 mm.	1"	2347	9,30	12,2	88
20 mm.	3/4"	4539	17,98	30,1	70
12,5mm	1/2"	7030	27,84	58,0	42
10 mm.	3/8"	3601	14,26	72,2	28
5 mm.	N° 4	3409	13,50	85,7	14
2,5mm	N° 8	1878	7,44	93,2	7
1,25mm	N° 16	731	2,90	96,1	4
0,630mm	N° 30	378	1,50	97,6	2
0,315mm	N° 50	225	0,89	98,5	2
0,160mm	N° 100	156	0,62	99,1	1
Residuo		231	0,91	100,0	0
TOTAL		25249	100,0		

Muestra N° 3 de M2					
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>
80 mm.	3"	0	0,00	0,0	100
63 mm.	2 1/2"	0	0,00	0,0	100
50 mm.	2"	0	0,00	0,0	100
40 mm.	1 1/2"	651	2,50	2,5	97
25 mm.	1"	2648	10,17	12,7	87
20 mm.	3/4"	5117	19,65	32,3	68
12,5mm	1/2"	6884	26,44	58,8	41
10 mm.	3/8"	3299	12,67	71,4	29
5 mm.	N° 4	4522	17,37	88,8	11
2,5mm	N° 8	1508	5,79	94,6	5
1,25mm	N° 16	512	1,97	96,6	3
0,630mm	N° 30	311	1,19	97,7	2
0,315mm	N° 50	203	0,78	98,5	1
0,160mm	N° 100	179	0,69	99,2	1
Residuo		204	0,78	100,0	0
TOTAL		26038	100,0		

Muestra Promedio de M2					
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>
80 mm.	3"	0	0,00	0,0	100
63 mm.	2 1/2"	0	0,00	0,0	100
50 mm.	2"	0	0,00	0,0	100
40 mm.	1 1/2"	702	2,74	2,7	97
25 mm.	1"	2425	9,46	12,2	88
20 mm.	3/4"	4861	18,96	31,2	69
12,5mm	1/2"	6848	26,71	57,9	42
10 mm.	3/8"	3537	13,80	71,7	28
5 mm.	N° 4	3931	15,33	87,0	13
2,5mm	N° 8	1729	6,75	93,8	6
1,25mm	N° 16	662	2,58	96,3	4
0,630mm	N° 30	334	1,30	97,6	2
0,315mm	N° 50	220	0,86	98,5	2
0,160mm	N° 100	166	0,65	99,1	1
Residuo		218	0,85	100,0	0
TOTAL		25634	100,0		

Granulometría Escoria M3:

Muestra N° 1 de M3					
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>
80 mm.	3"	0	0,00	0,0	100
63 mm.	2 1/2"	0	0,00	0,0	100
50 mm.	2"	0	0,00	0,0	100
40 mm.	1 1/2"	701	2,65	2,7	97
25 mm.	1"	3129	11,83	14,5	86
20 mm.	3/4"	6315	23,87	38,4	62
12,5mm	1/2"	4204	15,89	54,2	46
10 mm.	3/8"	5721	21,63	75,9	24
5 mm.	N° 4	3211	12,14	88,0	12
2,5mm	N° 8	1577	5,96	94,0	6
1,25mm	N° 16	586	2,22	96,2	4
0,630mm	N° 30	401	1,52	97,7	2
0,315mm	N° 50	213	0,81	98,5	1
0,160mm	N° 100	157	0,59	99,1	1
Residuo		236	0,89	100,0	0
TOTAL		26451	100,0		

Muestra N° 2 de M3					
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>
80 mm.	3"	0	0,00	0,0	100
63 mm.	2 1/2"	0	0,00	0,0	100
50 mm.	2"	0	0,00	0,0	100
40 mm.	1 1/2"	1005	3,81	3,8	96
25 mm.	1"	2241	8,49	12,3	88
20 mm.	3/4"	7087	26,86	39,2	61
12,5mm	1/2"	4998	18,94	58,1	42
10 mm.	3/8"	3476	13,18	71,3	29
5 mm.	N° 4	4049	15,35	86,6	13
2,5mm	N° 8	1857	7,04	93,7	6
1,25mm	N° 16	613	2,32	96,0	4
0,630mm	N° 30	316	1,20	97,2	3
0,315mm	N° 50	303	1,15	98,3	2
0,160mm	N° 100	146	0,55	98,9	1
Residuo		291	1,10	100,0	0
TOTAL		26382	100,0		

Muestra N° 3 de M3					
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>
80 mm.	3"	0	0,00	0,0	100
63 mm.	2 1/2"	0	0,00	0,0	100
50 mm.	2"	0	0,00	0,0	100
40 mm.	1 1/2"	812	3,20	3,2	97
25 mm.	1"	2318	9,14	12,3	88
20 mm.	3/4"	4807	18,95	31,3	69
12,5mm	1/2"	6593	25,99	57,3	43
10 mm.	3/8"	3708	14,62	71,9	28
5 mm.	N° 4	4300	16,95	88,8	11
2,5mm	N° 8	1311	5,17	94,0	6
1,25mm	N° 16	614	2,42	96,4	4
0,630mm	N° 30	308	1,21	97,6	2
0,315mm	N° 50	205	0,81	98,4	2
0,160mm	N° 100	159	0,63	99,1	1
Residuo		235	0,93	100,0	0
TOTAL		25370	100,0		

Muestra Promedio de M3					
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>
80 mm.	3"	0	0,00	0,0	100
63 mm.	2 1/2"	0	0,00	0,0	100
50 mm.	2"	0	0,00	0,0	100
40 mm.	1 1/2"	839	3,22	3,2	97
25 mm.	1"	2563	9,83	13,1	87
20 mm.	3/4"	6070	23,28	36,3	64
12,5mm	1/2"	5265	20,20	56,5	43
10 mm.	3/8"	4302	16,50	73,0	27
5 mm.	N° 4	3853	14,78	87,8	12
2,5mm	N° 8	1582	6,07	93,9	6
1,25mm	N° 16	604	2,32	96,2	4
0,630mm	N° 30	342	1,31	97,5	2
0,315mm	N° 50	240	0,92	98,4	2
0,160mm	N° 100	154	0,59	99,0	1
Residuo		254	0,97	100,0	0
TOTAL		26068	100,0		

Granulometría escoria M4:

Muestra Nº 1 de M4					
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>
80 mm.	3"	0	0,00	0,0	100
63 mm.	2 1/2"	0	0,00	0,0	100
50 mm.	2"	0	0,00	0,0	100
40 mm.	1 1/2"	763	2,96	3,0	97
25 mm.	1"	2171	8,42	11,4	89
20 mm.	3/4"	5117	19,86	31,2	69
12,5mm	1/2"	7973	30,94	62,2	38
10 mm.	3/8"	3699	14,35	76,5	23
5 mm.	Nº 4	3602	13,98	90,5	9
2,5mm	Nº 8	1172	4,55	95,1	5
1,25mm	Nº 16	473	1,84	96,9	3
0,630mm	Nº 30	208	0,81	97,7	2
0,315mm	Nº 50	226	0,88	98,6	1
0,160mm	Nº 100	155	0,60	99,2	1
Residuo		211	0,82	100,0	0
TOTAL		25770	100,0		

Muestra Nº 2 de M4					
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>
80 mm.	3"	0	0,00	0,0	100
63 mm.	2 1/2"	0	0,00	0,0	100
50 mm.	2"	0	0,00	0,0	100
40 mm.	1 1/2"	738	2,95	2,9	97
25 mm.	1"	1936	7,73	10,7	89
20 mm.	3/4"	5052	20,16	30,8	69
12,5mm	1/2"	6412	25,59	56,4	44
10 mm.	3/8"	3772	15,06	71,5	29
5 mm.	Nº 4	3647	14,56	86,0	14
2,5mm	Nº 8	1834	7,32	93,4	7
1,25mm	Nº 16	635	2,53	95,9	4
0,630mm	Nº 30	366	1,46	97,4	3
0,315mm	Nº 50	287	1,15	98,5	1
0,160mm	Nº 100	139	0,55	99,1	1
Residuo		236	0,94	100,0	0
TOTAL		25054	100,0		

Muestra N° 3 de M4					
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>
80 mm.	3"	0	0,00	0,0	100
63 mm.	2 1/2"	0	0,00	0,0	100
50 mm.	2"	0	0,00	0,0	100
40 mm.	1 1/2"	812	3,21	3,2	97
25 mm.	1"	2233	8,82	12,0	88
20 mm.	3/4"	5612	22,17	34,2	66
12,5mm	1/2"	6515	25,74	59,9	40
10 mm.	3/8"	4122	16,28	76,2	24
5 mm.	N° 4	3356	13,26	89,5	11
2,5mm	N° 8	1512	5,97	95,5	5
1,25mm	N° 16	501	1,98	97,4	3
0,630mm	N° 30	217	0,86	98,3	2
0,315mm	N° 50	188	0,74	99,0	1
0,160mm	N° 100	107	0,42	99,5	1
Residuo		138	0,55	100,0	0
TOTAL		25313	100,0		

Muestra Promedio de M4					
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>
80 mm.	3"	0	0,00	0,0	100
63 mm.	2 1/2"	0	0,00	0,0	100
50 mm.	2"	0	0,00	0,0	100
40 mm.	1 1/2"	771	3,04	3,0	97
25 mm.	1"	2113	8,33	11,4	89
20 mm.	3/4"	5260	20,73	32,1	68
12,5mm	1/2"	6967	27,45	59,5	40
10 mm.	3/8"	3864	15,23	74,8	25
5 mm.	N° 4	3535	13,93	88,7	11
2,5mm	N° 8	1506	5,93	94,6	5
1,25mm	N° 16	536	2,11	96,7	3
0,630mm	N° 30	264	1,04	97,8	2
0,315mm	N° 50	234	0,92	98,7	1
0,160mm	N° 100	134	0,53	99,2	1
Residuo		195	0,77	100,0	0
TOTAL		25379	100,0		

Anexo 2: Datos granulométricos y características físicas de porción gruesa de escoria.

Granulometrías de la grava escoria:

Muestra N° 1 grava escoria						
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>	<i>Recomendación Nch 163 Of 79. % pasa</i>
50mm	2"	0	0	0	100	100
40mm	1 1/2"	0	0	0	100	90-100
25 mm	1"	2080	11	11	89	
20 mm	3/4"	3062	17	28	72	35-70
12,5mm	1/2"	5964	33	61	39	
10 mm	3/8"	3485	19	81	19	10-30.
5 mm	N° 4	3492	19	100	0	0-5
Residuo		24	0,1	100	0	
TOTAL		18107	100			

Muestra N° 2 grava escoria						
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>	<i>Recomendación Nch 163 Of 79. % pasa</i>
50mm	2"	0	0	0	100	100
40mm	1 1/2"	28	0,2	0,2	100	90-100
25 mm	1"	2125	12	12	88	
20 mm	3/4"	3111	17	29	71	35-70
12,5mm	1/2"	5993	33	62	38	
10 mm	3/8"	3432	19	81	19	10-30.
5 mm	N° 4	3443	19	100	0	0-5
Residuo		13	0,1	100	0	
TOTAL		18145	99,8			

Muestra N° 3 grava escoria						
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>	<i>Recomendación Nch 163 Of 79. % pasa</i>
50mm	2"	0	0	0	100	100
40mm	1 1/2"	26	0,2	0,2	100	90-100
25 mm	1"	2239	13	13	87	
20 mm	3/4"	2689	16	29	71	35-70
12,5mm	1/2"	5757	33	62	38	
10 mm	3/8"	3296	19	81	19	10-30.
5 mm	N° 4	3307	19	100	0	0-5
Residuo		11	0,1	100	0	
TOTAL		17325	99,8			

Muestra promedio grava escoria						
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>	<i>Recomendación Nch 163 Of 79. % pasa</i>
50mm	2"	0	0	0	100	100
40mm	1 1/2"	18	0,1	0,1	100	90-100
25 mm	1"	2148	12	12	88	
20 mm	3/4"	2954	17	29	71	35-70
12,5mm	1/2"	5905	33	62	38	
10 mm	3/8"	3404	19	81	19	10-30.
5 mm	N° 4	3414	19	100	0	0-5
Residuo		16	0,1	100	0	
TOTAL		17841	100,0			

Densidad aparente de la grava escoria:

Densidad aparente suelta grava escoria (kg/m3)					
<i>MUESTRA</i>	<i>Peso del recipiente</i>	<i>Volumen del recipiente</i>	<i>Peso muestra + peso recipiente</i>	<i>Peso muestra</i>	<i>Dens. Ap suelta</i>
	kg	m3	kg	kg	kg/m3
Muestra 1	7,807	0,010116	29,432	21,625	2138
Muestra 2	7,807	0,010116	29,640	21,833	2158
Muestra 3	7,807	0,010116	29,161	21,354	2111
PROMEDIO					2136

Densidad aparente compactada grava escoria (kg/m³)					
<i>MUESTRA</i>	<i>Peso del recipiente</i>	<i>Volumen del recipiente</i>	<i>Peso muestra + peso recipiente</i>	<i>Peso muestra</i>	<i>Dens. Ap compactada</i>
	kg	m ³	kg	kg	kg/m ³
Muestra 1	7,807	0,010116	31,500	23,693	2342
Muestra 2	7,807	0,010116	31,220	23,413	2314
Muestra 3	7,807	0,010116	31,302	23,495	2323
PROMEDIO					2326

Densidad real, neta y absorción de agua de la grava escoria:

Densidad real, neta y absorción grava escoria							
<i>MUESTRA</i>	<i>Peso muestra sumergida (A)</i>	<i>Peso muestra SSS (B)</i>	<i>Peso muestra seca (C)</i>	<i>Densidad real SSS</i>	<i>Densidad real seca</i>	<i>Densidad neta</i>	<i>Absorción</i>
	g	g	g	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	%
Muestra 1	1275	1727	1723	3822	3814	3846	0,22
Muestra 2	1151	1562	1559	3803	3796	3824	0,19
Muestra 3	1246	1696	1693	3766	3759	3787	0,20
PROMEDIO				3797	3789	3819	0,20

Anexo 3: Datos granulométricos y características físicas de porción fina de escoria.

Granulometrías de la arena escoria:

Muestra N° 1 arena escoria						
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>	<i>Recomendación Nch 163 Of 79. % pasa</i>
10 mm	3/8"	0	0	0	100	100
5 mm	N° 4	6,6	1	1	99	95-100
2,5 mm	N° 8	483,6	57	58	42	80-100
1,25 mm	N° 16	118,2	14	72	28	50-85
0,630 mm	N° 30	72,1	8	80	20	25-60
0,315 mm	N° 50	68,6	8	88	12	10-30.
0,160 mm	N° 100	51,1	6	94	6	2-10.
Residuo		50	6	100	0	
TOTAL		850,2	100			

Muestra N° 2 arena escoria						
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>	<i>Recomendación Nch 163 Of 79. % pasa</i>
10 mm	3/8"	0	0		100	100
5 mm	N° 4	4,3	1	1	99	95-100
2,5 mm	N° 8	462,3	55	56	44	80-100
1,25 mm	N° 16	127,7	15	71	29	50-85
0,630 mm	N° 30	71,4	8	79	21	25-60
0,315 mm	N° 50	68,1	8	87	13	10-30.
0,160 mm	N° 100	53,6	6,4	94	6	2-10.
Residuo		53	6	100	0	
TOTAL		840,4	100			

Muestra N° 3 arena escoria						
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>	<i>Recomendación Nch 163 Of 79. % pasa</i>
10 mm	3/8"	0	0	0	100	100
5 mm	N° 4	7,5	1	1	99	95-100
2,5 mm	N° 8	466,4	53	54	46	80-100
1,25 mm	N° 16	125,5	14	69	31	50-85
0,630 mm	N° 30	80,1	9	78	22	25-60
0,315 mm	N° 50	72,4	8	86	14	10-30.
0,160 mm	N° 100	62,1	7	93	7	2-10.
Residuo		58	7	100	0	
TOTAL		872,0	100			

Muestra promedio arena escoria						
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>	<i>Recomendación Nch 163 Of 79. % pasa</i>
10 mm	3/8"	0	0		100	100
5 mm	N° 4	6,1	1	1	99	95-100
2,5 mm	N° 8	471	55	56	44	80-100
1,25 mm	N° 16	124	14	70	30	50-85
0,630 mm	N° 30	75	9	79	21	25-60
0,315 mm	N° 50	70	8	87	13	10-30.
0,160 mm	N° 100	56	7	94	6	2-10.
Residuo		54	6	100	0	
TOTAL		854,2	100			

Densidad aparente de la arena escoria:

Densidad aparente suelta arena escoria (kg/m³)					
<i>MUESTRA</i>	<i>Peso del recipiente</i>	<i>Volumen del recipiente</i>	<i>Peso muestra + peso recipiente</i>	<i>Peso muestra</i>	<i>Dens. Ap suelta</i>
	kg	m ³	kg	kg	kg/m ³
Muestra 1	1,320	0,00104	5,109	3,789	3643
Muestra 2	1,320	0,00104	5,133	3,813	3666
Muestra 3	1,320	0,00104	5,115	3,795	3649
PROMEDIO					3653

Densidad aparente compactada arena escoria (kg/m³)					
<i>MUESTRA</i>	<i>Peso del recipiente</i>	<i>Volumen del recipiente</i>	<i>Peso muestra + peso recipiente</i>	<i>Peso muestra</i>	<i>Dens. Ap compactada</i>
	kg	m ³	kg	kg	kg/m ³
Muestra 1	1,320	0,00104	5,234	3,914	3763
Muestra 2	1,320	0,00104	5,249	3,929	3778
Muestra 3	1,320	0,00104	5,219	3,899	3749
PROMEDIO					3763

Densidad real, neta y absorción de agua de la arena escoria:

Densidad real, neta y absorción arena escoria								
<i>MUESTRA</i>	<i>Peso matraz con agua</i>	<i>Peso matraz + muestra</i>	<i>Peso muestra SSS</i>	<i>Peso muestra seca</i>	<i>Densidad real SSS</i>	<i>Densidad real seca</i>	<i>Densidad neta</i>	<i>Absorción</i>
	g	g	g	g	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	%
Muestra 1	663,0	737,5	100,0	99,7	3922	3909,8	3956,3	0,30
Muestra 2	663,0	736,9	100,0	99,8	3831	3823,8	3853,3	0,20
Muestra 3	663,0	737,1	100,0	99,7	3861	3849,4	3894,5	0,30
PROMEDIO					3871	3861	3901	0,27

Material fino menor a 0,080mm de la arena escoria:

Material fino menor a 0,080mm (%)				
<i>MUESTRA</i>	<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	%
Muestra 1	853,6	812,1	41,5	4,9
Muestra 2	841,7	803,3	38,4	4,6
Muestra 3	862,1	821,2	40,9	4,7
PROMEDIO	852,5	812,2	40,3	4,7

Anexo 4: Datos granulométricos y características físicas de áridos convencionales.

Granulometrías de grava 40/20 convencional:

Muestra N° 1 grava 40/20						
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>	<i>Recomendación Nch 163 Of 79. % pasa</i>
50mm	2"	0	0	0	100	100
40mm	1 1/2"	641	4	4	96	90-100
25 mm	1"	11102	69	73	27	20-55
20 mm	3/4"	3724	23	96	4	0-15
10 mm	3/8"	594	4	100	0	0-5
Residuo		0	0	100	0	
TOTAL		16061	100			

Muestra N° 2 grava 40/20						
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>	<i>Recomendación Nch 163 Of 79. % pasa</i>
50mm	2"	0	0	0	100	100
40mm	1 1/2"	693	4	4	96	90-100
25 mm	1"	11353	69	73	27	20-55
20 mm	3/4"	3621	22	95	5	0-15
10 mm	3/8"	827	5	100	0	0-5
Residuo		0	0,0	100	0	
TOTAL		16494	100			

Muestra N° 3 grava 40/20						
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>	<i>Recomendación Nch 163 Of 79. % pasa</i>
50mm	2"	0	0	0	100	100
40mm	1 1/2"	451	3	3	97	90-100
25 mm	1"	11232	70	73	27	20-55
20 mm	3/4"	3677	23	96	4	0-15
10 mm	3/8"	715	4	100	0	0-5
Residuo		0	0,0	100	0	
TOTAL		16075	100			

Muestra promedio grava 40/20						
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>	<i>Recomendación Nch 163 Of 79. % pasa</i>
50mm	2"	0	0	0	100	100
40mm	1 1/2"	595	3,7	3,7	96	90-100
25 mm	1"	11229	69	73	27	20-55
20 mm	3/4"	3674	23	96	4	0-15
10 mm	3/8"	712	4	100	0	0-5
Residuo		0	0,0	100	0	
TOTAL		16210	100,0			

Granulometrías de gravilla 20/5 convencional:

Muestra N° 1 gravilla 20/5						
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>	<i>Recomendación Nch 163 Of 79. % pasa</i>
25 mm	1"	0	0	0	100	100
20 mm	3/4"	325	4	4	96	90-100
12,5 mm	1/2"	4217	52	56	44	
10 mm	3/8"	1541	19	75	25	20-55
5 mm	n°4	1946	24	99	1	0-10
2,5 mm	n°8	120	1	100	0	0-5
Residuo		0	0	100		
TOTAL		8149	100			

Muestra N° 2 gravilla 20/5						
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>	<i>Recomendación Nch 163 Of 79. % pasa</i>
25 mm	1"	0	0	0	100	100
20 mm	3/4"	312	4	4	96	90-100
12,5 mm	1/2"	4415	55	59	41	
10 mm	3/8"	1431	18	77	23	20-55
5 mm	n°4	1763	22	99	1	0-10
2,5 mm	n°8	97	1	100	0	0-5
Residuo		0	0	100		
TOTAL		8018	100			

Muestra N° 3 gravilla 20/5						
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>	<i>Recomendación Nch 163 Of 79. % pasa</i>
25 mm	1"	0	0	0	100	100
20 mm	3/4"	333	4	4	96	90-100
12,5 mm	1/2"	4340	53	57	43	
10 mm	3/8"	1511	18	76	24	20-55
5 mm	n°4	1869	23	98	2	0-10
2,5 mm	n°8	125	2	100	0	0-5
Residuo		0	0	100		
TOTAL		8178	100			

Muestra promedio gravilla 20/5						
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>	<i>Recomendación Nch 163 Of 79. % pasa</i>
25 mm	1"	0	0	0	100	100
20 mm	3/4"	323	4,0	4	96	90-100
12,5 mm	1/2"	4324	53	57	43	
10 mm	3/8"	1494	18	76	24	20-55
5 mm	n°4	1859	23	99	1	0-10
2,5 mm	n°8	114	1	100	0	0-5
Residuo		0	0,0	100		
TOTAL		8115	100			

Granulometrías de arena convencional:

Muestra Nº 1 arena						
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>	<i>Recomendación Nch 163 Of 79. % pasa</i>
10 mm	3/8"	0	0	0	100	100
5 mm	Nº 4	62	11	11	89	95-100
2,5 mm	Nº 8	145,7	25	36	64	80-100
1,25 mm	Nº 16	75,9	13	49	51	50-85
0,630 mm	Nº 30	50,1	9	58	42	25-60
0,315 mm	Nº 50	110,2	19	77	23	10-30.
0,160 mm	Nº 100	112,3	19	96	4	2-10.
Residuo		22	4	100	0	
TOTAL		578,2	100			

Muestra Nº 2 arena						
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>	<i>Recomendación Nch 163 Of 79. % pasa</i>
10 mm	3/8"	0	0		100	100
5 mm	Nº 4	31,4	6	6	94	95-100
2,5 mm	Nº 8	119,5	21	27	73	80-100
1,25 mm	Nº 16	74,9	13	40	60	50-85
0,630 mm	Nº 30	47,3	8	49	51	25-60
0,315 mm	Nº 50	128,5	23	72	28	10-30.
0,160 mm	Nº 100	126,4	23	95	5	2-10.
Residuo		30	5	100	0	
TOTAL		558,0	100			

Muestra N° 3 arena						
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>	<i>Recomendación Nch 163 Of 79. % pasa</i>
10 mm	3/8"	0	0	0	100	100
5 mm	N° 4	31,8	5	5	95	95-100
2,5 mm	N° 8	120	20	25	75	80-100
1,25 mm	N° 16	74,7	12	38	62	50-85
0,630 mm	N° 30	49,3	8	46	54	25-60
0,315 mm	N° 50	146,7	24	70	30	10-30.
0,160 mm	N° 100	145,1	24	95	5	2-10.
Residuo		31,9	5	100	0	
TOTAL		599,5	100			

Muestra promedio arena						
<i>Tamiz</i>		<i>Peso retenido (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Que pasa</i>	<i>Recomendación Nch 163 Of 79. % pasa</i>
10 mm	3/8"	0	0		100	100
5 mm	N° 4	41,7	7	7	93	95-100
2,5 mm	N° 8	128	22	29	71	80-100
1,25 mm	N° 16	75	13	42	58	50-85
0,630 mm	N° 30	49	8	51	49	25-60
0,315 mm	N° 50	128	22	73	27	10-30.
0,160 mm	N° 100	128	22	95	5	2-10.
Residuo		28	5	100	0	
TOTAL		578,6	100			

Anexo 5: Granulometría de áridos combinados

Árido combinado Grava convencional (40/20) - gravilla convencional (20/5)						
<i>Tamiz</i>		<i>% Que pasa G(40/20)</i>	<i>% Que pasa M(20/5)</i>	<i>Banda combinada</i>	<i>% Que pasa GM(40/5)</i>	<i>Recomendación Nch 163 Of 79. % pasa</i>
50mm	2"	100		50+50	100	100
40mm	1 1/2"	96		48+50	98	90-100
25mm	1"	27	100	14+50	64	
20mm	3/4"	4	96	2+48	50	35-70
12,5mm	1/2"		43	22	22	
10mm	3/8"		24	12	12	10.-30
5mm	n°4		1	1	1	0-5
Tanteo		0,5	0,5			

Árido combinado Grava convencional (40/20) - Arena convencional						
<i>Tamiz</i>		<i>% Que pasa GM(40/5)</i>	<i>% Que pasa A</i>	<i>Banda combinada</i>	<i>% Que pasa AT(40/5)</i>	<i>Recomendación Nch 163 Of 79. % pasa</i>
50mm	2"	100		62+38	100	
40mm	1 1/2"	98		61+38	99	100
25mm	1"	64		40+38	78	
20mm	3/4"	50		31+38	69	60-80
12,5mm	1/2"	22		14+38	52	
10mm	3/8"	12	100	7+38	45	40-61
5mm	n°4	1	93	1+35	36	24-48
2,5mm	n°8		71	27	27	15-37
1,25mm	n°16		58	22	22	10--28
0,630mm	n°30		49	19	19	6--19
0,315mm	n°50		27	10	10	3--11
0,160mm	n°100		5	2	2	2--5
Tanteo		0,62	0,38			

Árido combinado Escoria (40/5) - Arena convencional						
<i>Tamiz</i>		<i>% Que pasa GE(40/5)</i>	<i>% Que pasa pasa AC</i>	<i>Banda combinada</i>	<i>% Que pasa AT(40/5)</i>	<i>Recomendación Nch 163 Of 79. % pasa</i>
40mm	1 1/2"	100		61+39	100	100
25mm	1"	87		53+39	92	
20mm	3/4"	71		43+39	82	60-80
12,5mm	1/2"	38		23+39	62	
10mm	3/8"	19	100	12+39	51	40-61
5mm	n°4		93	36	36	24-48
2,5mm	n°8		71	28	28	15-37
1,25mm	n°16		58	23	23	10--28
0,630mm	n°30		49	19	19	6--19
0,315mm	n°50		27	11	11	3--11
0,160mm	n°100		5	2	2	2--5
Tanteo		0,61	0,39			

Árido combinado Erena escoria - Arena convencional						
<i>Tamiz</i>		<i>% Que pasa AE</i>	<i>% Que pasa AC</i>	<i>Banda combinada</i>	<i>% Que pasa A</i>	<i>Recomendación Nch 163 Of 79. % pasa</i>
10mm	3/8"	100	100	25+75	100	100.
5mm	n°4	99	93	25+70	95	95-100
2,5mm	n°8	44	71	11+53	64	80-100
1,25mm	n°16	30	58	8+44	52	50-85
0,630mm	n°30	21	49	5+37	42	25-60
0,315mm	n°50	13	27	3+20	23	10--30
0,160mm	n°100	6	5	2+4	6	2--10
Tanteo		0,25	0,75			

Árido combinado Grava escoria (40/5) - (Arena escoria + arena convencional)						
<i>Tamiz</i>		<i>% Que pasa GE(40/5)</i>	<i>% Que pasa A</i>	<i>Banda combinada</i>	<i>% Que pasa AT(40/5)</i>	<i>Recomendación Nch 163 Of 79. % pasa</i>
40mm	1 1/2"	100		61+38	100	100
25mm	1"	87		54+38	92	
20mm	3/4"	71		44+38	82	60-80
12,5mm	1/2"	38		24+38	62	
10mm	3/8"	19	100	12+38	50	40-61
5mm	n°4		95	36	36	24-48
2,5mm	n°8		64	24	24	15-37
1,25mm	n°16		52	20	20	10--28
0,630mm	n°30		42	16	16	6--19
0,315mm	n°50		23	9	9	3--11
0,160mm	n°100		6	2	2	2--5
Tanteo		0,62	0,38			

Anexo 6: Resumen de dosificaciones

Mezcla A: Grava de escoria + Arena (Escoria + convencional). **GE + A(E+C)**

Materiales	Mezcla A: GE + A(E+C)		
	Peso (kg)		
	Teórica	Corregida	Para 60 lts
Cemento	340	340	20,4
Agua	182	182	11
GE	1195	1430	85,8
AE	193	232	13,9
G(40/20)	0	0	0
M(20/5)	0	0	0
AC	540	609	36,8
Total	2450	2793	167,9

Mezcla B: Grava de escoria + Arena convencional. **GE + AC**

Mezcla B: GE + AC			
Peso (kg)			
Materiales	Teórica	Corregida	Para 60 lts
Cemento	340	340	20,4
Agua	182	182	11
GE	1176	1334	80
AE	0	0	0
G(40/20)	0	0	0
M(20/5)	0	0	0
AC	752	818	49,1
Total	2450	2674	160,5

Mezcla P: Grava convencional + Arena convencional. **GC + AC**

Mezcla B: GE + AC			
Peso (kg)			
Materiales	Teórica	Corregida	Para 60 lts
Cemento	340	340	20,4
Agua	182	182	11
GE	0	0	0
AE	0	0	0
G(40/20)	598	547	32,8
M(20/5)	598	548	32,9
AC	733	675	40,5
Total	2451	2292	137,6