UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

UTILIZACION DE ESCORIA DE COBRE EN REMPLAZO A LA ARENA PARA LADRILLOS DE HORMIGON.

Trabajo de Titulación para optar al Título de Técnico Universitario en MINERÍA Y METALURGIA

Alumnos:
Lucas Herrera Seguel
Constanza Zenteno Bustamante
Profesor Guía:
Ing. Luis Gutiérrez Meneses

2018

RESUMEN

KEYWORDS: ESCORIA – CEMENTO – ARENA – LADRILLOS

Durante la última década la presencia de yacimientos de cobre del tipo óxidos han disminuido, dándole paso a una nueva etapa de mayor presencia de minerales sulfurados, esto ha producido que la industria pirometalúrgica tuviera que aumentar la cantidad de concentrado procesado en cada una de las fundiciones que se encuentran a lo largo de Chile. Finalmente el aumento de esta industria se ha visto reflejado en una producción promedio de 297.000ton/año (Codelco, 2011, Informe de sustentabilidad) de escoria solo en la fundición de ventanas. El problema principal no radica solo en la producción de este residuo, si no que el problema se encuentra al analizar que este residuo actualmente en chile se está destinando solo a su disposición final sin mayor análisis de los usos que se le pudiesen dar.

Es por todo lo anterior que los escoriales han aumentado su tamaño de manera sostenida y al alza como muestra la siguiente imagen, es aquí donde nace la necesidad de continuar con la investigación para darle uso a estos residuos.

Aumento escorial Ventana

Fuente: Escoriales Codelco división ventanas 2004, 2010, 2016.

El presente estudio busca poder analizar las aplicaciones que puede tener la escoria de cobre proveniente de la Fundición Ventanas, en la fabricación de ladrillos mezclando un agregado fino de escoria de cobre con cemento, para de esta forma poder proponer un ladrillo que sirva como remplazo a los actuales ladrillos de hormigón, y de esta forma reducir el crecimiento de los escoriales de fundición y su impacto al medio.

En primera instancia el presente trabajo busca caracterizar la escoria de cobre para su utilización como arena en la elaboración de hormigón, para esto se debe

considerar tanto la granulometría como la composición referencial de esta, esta primera parte contempla netamente un estudio bibliográfico de la escoria de cobre.

Una vez que se ha demostrado que la escoria de cobre puede ser utilizada como arena en la construcción de hormigón, mediante pruebas de laboratorio, es necesario saber la dosificación exacta para elaborar estas probetas según lo dictado por la norma Nch 170. El proceso siguiente consta en la fabricación tanto de hormigón estándar H20 como de hormigón remplazando la mayor cantidad posible de arena por escoria de cobre.

Para la realización de este proyecto se considera un proceso de experimentación el cual se realizará en el laboratorio de metalurgia y construcción ubicado en la Universidad Técnica Federico Santa Maria, Sede Viña del Mar, este proceso consiste en poder someter probetas formadas por cemento y escoria a diferentes ensayos de compresión, capilaridad y absorción.

Finalmente y luego de determinadas las propiedades de este nuevo material, el presente trabajo comparará los resultados obtenidos de las pruebas, tanto en las probetas originales de hormigón como en las probetas realizadas con cemento y escoria. El objetivo de la investigación es poder sobreponer y cotejar los datos obtenidos de las pruebas en ambos casos y poder concluir la homologación de este producto final con los actuales ladrillos de hormigón.

INDICE DE MATERIAS

Introducción **1**

Objetivos **2**

Capítulo 1: Establecer las características de la escoria de cobre para ser utilizada como arena en hormigón de acuerdo a la NCh 163 ..... **3**

1.1 Áridos para hormigones 3

1.1.1 Generalidades sobre áridos 3

1.1.2 Requisitos granulométricos de la arena 4

1.1.3 Tipos de granulometría de la arena 4

1.1.4 Estados de humedad de los áridos 6

1.2 Escoria de cobre 8

1.2.1 Generalidades sobre escoria 8

1.2.2 Obtención de escoria de cobre 9

1.2.3 Clasificación de escoria de cobre 9

1.3 Escoria de cobre en relación a los áridos 12

1.3.1 Bandas granulométricas 12

1.3.2 Densidad de la escoria de cobre 12

1.3.3 Estado de humedad de la escoria de cobre 13

Capítulo 2: Determinar la dosificación para la fabricación de ladrillos de hormigón según la norma NCh 170 ..... **14**

2.1 Hormigones 14

2.1.1 Generalidades sobre hormigón 14

2.1.2 Clasificación de hormigones 14

2.1.3 Dosificación para hormigones 15

2.1.3.1 Determinación de la resistencia media requerida 16

2.1.3.2 Determinación razón agua-cemento 18

2.1.3.3 Dosificación de agua 20

2.1.3.4 Dosificación de cemento 21

2.1.3.5 Dosificación de aire 21

2.1.3.6 Dosificación de áridos 22

2.1.4 Dosificación final 31

Capítulo 3: Evaluación de probetas de hormigón H20 estándar y árido combinado mediante pruebas de absorción, capilaridad y ensayo de compresión respecto a la norma NCh 182 33

3.1 Construcción de probetas 33

3.1.1 Construcción de moldes 33

3.1.2 Moldeado de probetas 34

3.1.2.1 Colocación de hormigón 34

3.1.2.2 Compactación 34

3.1.2.3 Enrase 35

3.1.2.4 Desmolde y marcado 36

3.1.2.5 Curado 36

3.2 Ensayos para bloques de hormigón 37

3.2.1 Ensayo de absorción 37

3.2.2 Ensayo de capilaridad 38

3.2.3 Ensayo de compresión 40

3.3 Resultados de ensayo 42

3.3.1 Resultados ensayo de compresión 42

3.3.1.1 Probetas de hormigón estándar 42

3.3.1.2 Probetas de hormigón árido combinado 44

3.3.2 Resultados ensayo de capilaridad 47

3.3.2.1 Determinación del coeficiente Cb 48

3.3.3 Resultados ensayo de absorción 50

3.3.2.1 Cálculos ensayo de absorción 51

Conclusiones y recomendaciones 54

Bibliografía 58

Anexos 59

Anexo A 59

Anexo B 67

Anexo C 72

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1.Estado de humedad de áridos 7

Figura 1-2.Escoria granallada 10

Figura 1-3.Escoria de botadero 11

Figura 1-4.Escoria expandida 11

Figura 2-1.Picnometría realizada a muestras de arena 11

Figura 2-2.Resolución de ecuación cuadrática 25

Figura 3-1.Terciado estructural 9mm 33

Figura 3-2.Nivel 34

Figura 3-3.Moldeado de hormigón 35

Figura 3-4.Enrase de hormigón 36

Figura 3-5.Ensayo de capilaridad 39

Figura 3-6.Ensayo de compresión 45

Figura 3-7.Bloques de hormigón estándar y árido combinado ensayados 46

Figura 3-8.Ejecución de ensayo de capilaridad 48

Figura 3-9.Ensayo de absorción 51

INDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Requisitos generales áridos 3
Tabla 1-2. Granulometría de la arena 4
Tabla 1-3. Tipos granulométricos de arenas 6
Tabla 1-4. Composición escoria de cobre 8
Tabla 1-5. Densidades arena y escoria de cobre 13
Tabla 1-6. Determinación de características requeridas 13
Tabla 2-1. Clasificación de hormigones por resistencia a la compresión 15
Tabla 2-2. Elección del grado de hormigón 17
Tabla 2-3. Factor estadístico t 17
Tabla 2-4. Valor estimado 18
Tabla 2-5. Razón agua-cemento para resistencia media requerida 19
Tabla 2-6. Interpolación razón agua-cemento 19
Tabla 2-7. Volumen estimado volumen de amasado (m^3) 20
Tabla 2-8. Aire promedio atrapado 21
Tabla 2-9. Densidades de áridos a utilizar 22
Tabla 2-10. Densidad para proporciones propuestas 26
Tabla 2-11. Humedad contenida en áridos 29
Tabla 2-12. Dosificación para $1m^3$ de hormigón estándar 32
Tabla 2-13. Dosificación para $1m^3$ de hormigón árido combinado 32
Tabla 3-1. Resumen resultados ensayo de compresión 46
Tabla 3-2. Resumen resultados ensayo de capilaridad 49
Tabla 3-3. Resumen resultados ensayo de absorción 53

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-1. Bandas límites de áridos 12

Gráfico 2-1. Densidad vs % de escoria 24

Gráfico 2-2. Elección línea de tendencia polinómica 25

Gráfico 2-3. Variación en correlación de datos 26

Gráfico 2-4. Granulometría de áridos estudiados 27

Gráfico 2-5. Curva para grava más árido combinado 28

Gráfico 3-1. Resistencia a la compresión 47

Gráfico 3-2. Coeficiente de absorción por capilaridad 50

Gráfico 3-3. Coeficiente de absorción porcentual 53

SIGLA Y SIMBOLOGÍA

SIGLA

ASTM : American Society of Testing Materials (Asociación Americana de Ensayo de Materiales)

NCh : Normas Chilenas.

USM : Universidad Técnica Federico Santa María.

JMC : Sede José Miguel Carrera.

CODELCO : Corporación Nacional del Cobre.

Cu : Cobre.

RAF : Refinado a Fuego

AC : Árido combinado

% : Porcentaje.

SIMBOLOGIA

kg : Kilogramo

Mpa : Mega Pascal

mm : milímetro

g : gramo

°C : Grado Celsius

cm^3 : Centímetro cúbico

m^3 : Metro cúbico

L : Litro

kgf : Kilopondio

ρ : Densidad

INTRODUCCIÓN

En la industria del cobre, uno de los minerales tratados son los sulfuros de cobre, el cual contiene azufre en su composición, estos minerales son tratados mediante la vía de la pirometalurgia, en la que luego de una línea de procesos finalmente son fundidos en un horno donde el cobre se separa del azufre y se genera una disociación mediante la densidad de los diferente elementos fundidos.

Es en el proceso de fundición donde el principal residuo que se genera es la escoria, material que queda en el horno sin un valor comercial relevante, esta mezcla de elementos termina en acopios llamados escoriales en los cuales se vierte el material fundido y termina acumulándose de manera progresiva aumentando el tamaño de los escoriales y el impacto que puedan tener estos en sus alrededores.

Desde la década de los 70's comenzaron a realizarse estudios sobre las posibles aplicaciones que puede tener la escoria de cobre como un material de construcción o agregado a estos mismos, los estudios realizados desde esa época contemplaron; construcción de carreteras, agregados parciales en hormigón, agregados al asfalto, entre otros. Desde hace más de 40 años que existen estudios que avalan las diferentes aplicaciones de la escoria tanto siderúrgica como la escoria de cobre, principalmente los análisis realizados han estado enfocados en la escoria de la industria siderúrgica, la escoria de cobre se ve desacreditada en este aspecto debido a que independiente de que ambas son residuos de procesos similares, las composiciones y la caracterización de cada una será diferente por definición. Independiente de las investigaciones que se han realizado a las aplicaciones de la escoria, no han podido frenar el aumento en la producción de este residuo y es ahí donde nace la necesidad de poder analizar y proponer nuevos campos en los que este residuo pueda volverse un bien comercializable y no un residuo.

Este trabajo consiste en poder analizar tanto la homologación de la escoria de cobre a la arena como la aplicación que puede tener esta en la construcción de ladrillos de cemento y escoria, para lo cual deben realizarse pruebas tanto en el laboratorio de metalurgia y laboratorio de mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa Maria – Sede Viña del Mar, con el objetivo de determinar si el remplazo de arena por escoria, pueden lograr igualar las propiedades físicas como las que establecen las normas chilenas sobre ladrillos de hormigón.

Finalmente esta investigación plantea sus resultados comparando los resultados obtenidos en ladrillos de hormigón H20 y los ladrillos producidos con escoria de cobre como arena para de esta forma lograr homologar ambos por sus características.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Utilizar escoria de cobre como remplazo a la arena en la fabricación de ladrillos de hormigón para reducir los escoriales como residuos mineros masivos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las características de la escoria de cobre para ser utilizada como árido fino en hormigón de acuerdo a la norma NCh 163 para remplazar a la arena en su fabricación.
- Determinar la dosificación para la fabricación de ladrillos de hormigón según la norma NCh 170 para la construcción de probetas a ensayar.
- Evaluar probetas de hormigón H20 estándar y árido combinado mediante pruebas de absorción, capilaridad y ensayo de compresión respecto a la norma NCh 182 para comparar estas propiedades.

CAPITULO 1: ESTABLECER LAS CARACTERISTICAS DE LA ESCORIA DE COBRE PARA SER UTILIZADA COMO ARENA EN HORMIGON DE ACUERDO A LA NCH 163.

1.1 ARIDOS PARA HORMIGONES.

1.1.1 Generalidades sobre áridos.

En Chile tanto las normas NCh 165 y 163 [3] establecen cuales son las características que deben cumplir los áridos para la construcción de hormigón, en primera instancia se define árido como material pétreo compuesto de partículas duras, de forma y tamaño estable, y arena como el árido que atraviesa el tamiz nominal de 5mm y es retenido en el tamiz de 0,08mm con algunas tolerancias que establece la norma, el 80% debe cumplir estas características.

La arena debe estar constituida por partículas duras, forma y tamaño estable, deben estar limpias y libres de terrones, partículas blandas o laminadas, arcillas, impurezas orgánicas, sales y otras sustancias que por su naturaleza o cantidad afecten la resistencia o durabilidad del hormigón. Los rangos tolerables se muestran en la tabla 1-1 (Hay que considerar que la norma establece un aumento del 6% en estos límites al tratarse de áridos triturados).

Tabla 1-1 Requisitos generales áridos.

Requisitos		Valores límites		Norma de ensayo NCh
		Grava	Arena	
1. Material fino menor que 0,080 mm (Nota 1):				
a) para hormigón sometido a desgaste	% máximo	0,5	3,0	1223
b) para todo otro hormigón	% máximo	1,0	5,0	
2. Impurezas orgánicas (Nota 2) referidas a color límite según patrón		-	amarillo claro	166
3. Granulometría				165
4. Partículas desmenuzables	% máximo	5,0	3,0	1327
5. Partículas blandas	% máximo	5,0	-	
6. Cloruros como Cl^- (Notas 3 y 6) (kg/m^3 de hormigón):				
a) para hormigón armado*)	máximo	1,20		1444
b) para hormigón pretensado	máximo	0,25		
7. Sulfatos y sulfuros como SO_4^{2-} (Notas 4, 5 y 6) (kg/m^3 de hormigón):				
a) sulfatos solubles en agua	máximo	0,60		1444
b) sulfuros oxidables	máximo	1,80		
8. Carbón y lignito:				
a) para hormigón a la vista	% máximo	0,5	0,5	
b) para todo otro hormigón	% máximo	1	1	

Fuente: NCh 163.Of79

1.1.2 Requisitos granulométricos de la arena

La granulometría de la arena en Chile, determinada por la norma NCh 165 [4], establece los límites permisibles que se muestran en la tabla 1-2.

Tabla 1-2 Granulometría de la arena

Tamices, mm	% acumulado que pasa
10	100
5	95 - 100
2,5	80 - 100
1,25	50 - 85
0,630	25 - 60
0,315	10 - 30
0,160	2 - 10

Fuente: Norma chilena NCh 163

Para poder comenzar a hablar de escoria de cobre como arena es necesario hacer énfasis que ambas deben someterse a pruebas similares que se establecen en las normas chilenas, las arenas silíceas aprobadas por la norma chilena deben entregar resultados similares tanto en pruebas de granulometría y densidad.

1.1.3 Tipos de granulometría de la arena.

La arena que se comercializa comúnmente tiene una granulometría definida dependiendo del uso que se le dará a esta, en el caso de construcción habitacional la arena utilizada debe encontrarse en una granulometría media o normal, esta cumple con todos los requerimientos establecidos anteriormente y se utiliza en la fabricación de hormigones con características corrientes. La importancia de la utilización de esta granulometría es que cumple con las condiciones de consumo de cemento normales, en la tabla 1-3 se muestra las características de los diferentes tipos de arenas. Principalmente las diferentes granulometrías de la arena se pueden clasificar en 7 tipos:

- Granulometría muy gruesa: Este árido no se encuentra comúnmente en nuestro país, no proviene de una selección natural, al contrario se produce por una selección mecánica dentro de las plantas de áridos, normalmente se elabora con dos fracciones de diferente granulometría, una muy gruesa y otra de granulometría normal. La propiedad principal de estos tipos de arena es que

pueden alcanzar una resistencia determinada un menor consumo de cemento, esto debido a que una mayor parte de su volumen es utilizada por el árido.

- Granulometría gruesa: similares a los muy gruesos, la diferencia radica en la mayor presencia de áridos medios, aunque poseen menor resistencia en la elaboración de hormigones, tienen la particularidad de ser menos propensos a la segregación y de esta forma poder ser más manipulables y útiles para la construcción de piezas prefabricadas de gran envergadura y alta resistencia.

- Granulometría media: corresponde a la recomendación para la construcción de hormigones para obras habitacionales, es respaldada tanto por la norma chilena NCh 163 como la norma internacional ASTM C33, su granulometría media o normal es ideal debido a que combina o promedia las propiedades de ambos extremos en tamaño de grano.

- Granulometría fina: En primer lugar requieren una mayor cantidad de cemento y agua, esto se debe a la mayor superficie (mayor porosidad), hormigones elaborados con estos áridos tienen la cualidad de ser muy manipulables y controlados por el moldaje, se encuentran recomendados para el trabajo de terminaciones y otras superficies que requieran ser lisas y homogéneas pero sin mayor carga, esto debido al riesgo de fisura.

- Granulometría muy fina: Solo se tolera su uso en el caso que no exista la posibilidad de obtener alguna de las granulometrías anteriores, puede ser utilizada como agregado extra en granulometrías discontinuas, pero no se debe utilizar por sí sola, esto ya que aumenta todas las características negativas de la arena fina aumentando así los riesgos.

- Granulometría discontinua: Este caso particular se puede tolerar cuando la distribución del tamaño de los granos no es homogénea, pero este árido debe tener por requisito un 70% igual o mayor a la granulometría media, ignorando la mala distribución que exista en las partículas mas finas.

Tabla 1-3 Tipos granulométricos de arenas

% acumulado que pasa para los siguientes tamaños							
Tamaños	1	2	3	4	5	6	7
Denomi-nación / Tamices, mm	Muy gruesa	Gruesa	Media o normal	Media gruesa	Fina	Muy fina	Discon-tinua
10	100	100	100	100	100	100	100
5	60-75	75-90	95-100	70-90	90-100	95-100	30-60
2,5	35-55	55-80	80-100	40-80	85-100	90-100	30-40
1,25	27-50	35-60	50-85	40-70	70- 90	85-100	30-40
0,630	15-40	22-40	25-60	40-60	60- 80	80-100	17-40
0,315	8-25	12-25	10-30	25-37	37- 50	50- 62	9-25
0,160	3-10	3-10	2-10	6-13	12- 20	15- 20	4-10

Fuente: Norma NCh 163

1.1.4 Estados de humedad de los áridos.

Debido al tamaño de partículas que posee la arena (granos) esto genera una gran cantidad de superficie en la cual el agua actúa de manera muy importante, principalmente esta cantidad de agua se debe tener en consideración para la dosificación de agua en la elaboración de hormigón, estas pequeñas partículas poseen gran cantidad de poros superficiales que son accesibles para ser penetrados por la humedad, el grado de humedad o sequedad que posee un árido determina cuatro estados higrométricos bien definidos.

- Árido en estado seco: El árido es secado hasta alcanzar la masa constante en estufa, esto ocurre a 110°C, en este estado a escala de laboratorio, el árido posee su máxima capacidad de absorción y corresponde al estado en el cual se deben efectuar las pruebas de absorción de los áridos.

- Árido en estado parcialmente seco: En este caso el árido ha sido expuesto al aire ambiental, donde cuyas partículas no tienen humedad superficial, pero en sus poros accesibles existe humedad parcial que no llega a saturarlos, es en este estado que se encuentran la mayoría de los áridos en las obras y en su almacenamiento.

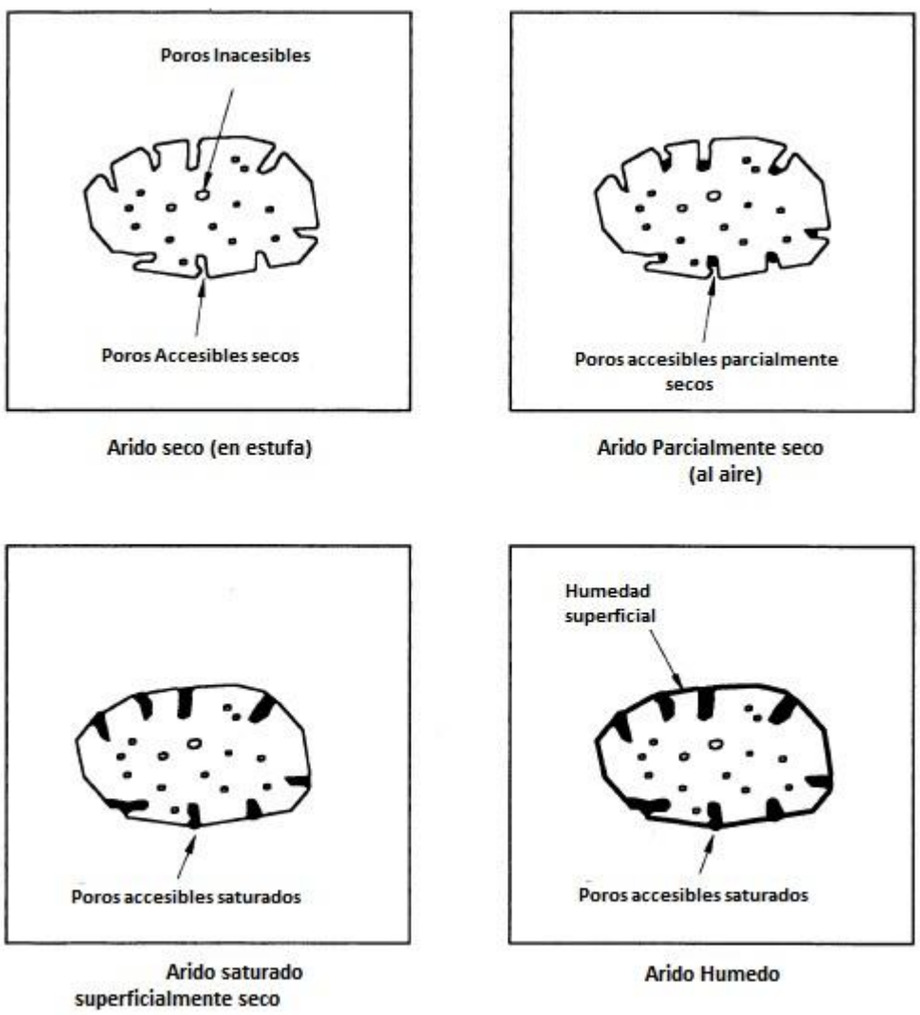
- Árido en estado saturado o superficialmente seco: Es aquel árido que no posee humedad en la superficie, pero sus poros accesibles están saturados de humedad. Es el estado que se debe utilizar para el cálculo de las dosificaciones de agua en

el hormigón y se logra secando el árido a estufa, hundiendo este por 24 horas en agua, y finalmente secando en aire ambiental por un periodo superior a 7 días.

- Árido en estado Húmedo: la humedad presente satura tanto los poros como la superficie del árido, por lo anterior este cede su humedad libremente durante la fabricación del hormigón alterando así la dosificación del agua, es la principal causante del esponjamiento de las arenas.

En la figura, 1-1 se muestran los cuatro posibles estados de humedad de los áridos, representando de forma gráfica el contenido de agua tanto en los poros como en la superficie.

Figura 1-1 Estados de humedad de áridos



Fuente: Norma NCh 163

1.2 ESCORIA DE COBRE.

1.2.1 Generalidades sobre escoria.

La escoria de cobre se conoce comúnmente como un residuo del proceso de fundición, durante el tratamiento de minerales sulfurados mediante la pirometalurgia es donde se genera la separación del material fundido mediante su densidad, es en este proceso donde se produce la escoria de cobre la cual se retira por la parte superior del horno.

Durante la fundición del material concentrado se producen dos fases líquidas separables o inmiscibles: la mata rica en cobre y la escoria. La mata, según su contenido de cobre, continúa luego en el proceso de refinación, mientras que la escoria fundida se descarga directamente o pasa a procesos de recuperación de cobre para seguir disminuyendo la ley de esta escoria que puede contener hasta un 8% de Cu.

Son los óxidos contenidos en la carga del horno y de los óxidos de hierro que se producen por la oxidación durante el procesamiento piro metalúrgico aquellos que componen principalmente la escoria. Dependiendo de los minerales, concentrados, fundentes, condiciones de operación y otros diversos factores, los principales óxidos que se presentan en la escoria son [1]:

- Óxido de hierro (como FeO, Fe3O4) de 30% a 40%
- Óxido de sílice (SiO2) de 35% a 40%
- Óxido de aluminio (Al2O3) hasta 10%
- Óxido de calcio (CaO) hasta 10%

Según estudios anteriores, y tomando en cuenta valores promedios de la composición de esta, la escoria de cobre contiene los siguientes compuestos.

Tabla 1-4 Composición escoria de cobre

Componente	Porcentaje (%)
Cobre (Cu)	0,86
Magnetita (Fe3O4)	6,6
Fierro (Fe)	42,6
Sílice (SiO2)	32,7
Alúmina (Al2O3)	6,6
Otros	10,64

Fuente: Uso de escoria de cobre en cemento, Sebastián Orizola Gómez

1.2.2 Obtención de escoria de cobre.

Para el caso de la mayoría de las fundiciones, el proceso de generación de escoria comienza con la extracción de los sulfuros. El mineral obtenido, es chancado y molido para ser concentrado mediante flotación en el concentrador. El concentrado así obtenido es filtrado y secado resultando con un 8% de humedad. Luego, este pasa al horno de reverbero, el cual produce mata (sulfuro de cobre y hierro) con un contenido de cobre de 50%, y como subproducto, escoria de cobre que va a botadero. El eje o mata se vacía por el fondo del horno de reverbero y se transporta a los hornos convertidores para continuar su procesamiento piro metalúrgico.

"Ambas canaletas, tanto la que conduce la escoria al horno eléctrico como la que conduce el metal blanco a la etapa de granallado, se encuentran totalmente confinadas de tal forma que todos los gases sean captados"

PORTAL MINERO EDICIONES, Manual General de Minería y Metalurgia. Santiago: Servicio de Impresiones Laser S.A, 2006. 229 p. ISBN 956-8514-01-5.

Como producto del convertidor se obtiene metal blanco. Que posee un 75% de cobre, el que alimenta al convertidor convencional y, como residuo, se obtiene escoria del convertidor que recircula al horno de reverbero o al horno de limpieza de escoria, ya que posee un alto contenido de cobre (aproximadamente un 8%).

Del horno de limpieza de escoria se obtiene una mata enriquecida con un 70% en cobre, el cual recircula al convertidor y, como residuo, se obtiene una escoria que posee un 0.8% de cobre, la que va a botadero.

Del convertidor convencional se obtiene como producto final cobre blíster, con una pureza de 99.4% de cobre, el que pasa a un horno de retención, y luego a ruedas de moldeo donde toma la forma de barras, o bien, pasa a refinación en hornos de refinado a fuego, en esta instancia es primordial la adhesión de madera para terminar el proceso de conversión retirando la mayor cantidad de impurezas hasta poder alcanzar Cu RAF, refinado a fuego, en otro caso y dependiendo de la fundición, el cobre anódico puede ser llevado a un proceso por vía húmeda de electro-refinación, donde finalmente es convertido en cobre catódico.

1.2.3 Clasificación de escoria de cobre.

Las escorias de cobre se clasifican principalmente según dos criterios, el primero se divide en dos índices representativos de la cantidad de sílice que la escoria contenga, el primer índice llamado "silicatación" hace referencia a la cantidad de óxidos de sílice que esta contiene, en relación a la cantidad total de óxidos que la escoria posee, mientras que el segundo índice "grado de saturación", se obtiene calculando la razón entre el

número total de g/mol de los componentes básicos y el número de g/mol de los componentes ácidos, si este último índice es igual a 1 la escoria será neutra, en caso de ser mayor será básica, y para escorias ácidas el índice será menor a uno.

El segundo criterio y en el cual se basa esta investigación esta relacionado con el tiempo de enfriamiento de la escoria el cual le entrega propiedades especificas a esta. Tal como se ha mencionado, la escoria es un material de residuo asociado a un proceso metalúrgico. La escoria de cobre se puede conseguir acopiada en terrenos aledaños a las fundiciones a temperatura ambiente. Cabe recalcar que el tiempo que demore en llegar desde la temperatura en estado líquido a la final de disposición, cumple un rol fundamental en el poder de reactividad del material.

Escoria Granallada: Este tipo de escoria, se obtiene cuando el material pasa de estado líquido a sólido en el menor tiempo posible. Existen varias técnicas para ello, entre las cuales una consiste en verter la escoria fundida, en un pozo de granallado, el que mantiene una cantidad de agua constante que se renueva de acuerdo a la granulación que se realice, dentro del cual se produce el enfriamiento casi instantáneo de la escoria, la que pasa de estado líquido a sólido, pasando desde una temperatura de aproximadamente 1150 °C a menos de 100 °C respectivamente. Una vez producida la granulación, es separada el agua de la escoria, esta última siendo llevada posteriormente a pilas de acopio. En este proceso no se producen modificaciones o reacciones químicas que alteren la composición de la escoria, sino que ocurren cambios mecánicos y físicos al cambiar de estado líquido a granos sólidos, formando un material cuya estructura estará constituida mayor mente por una estructura amorfa o vítrea. Este tipo de formación, provee a la escoria de cobre una menor masa por unidad de volumen como se muestra en la figura 1-2.

Figura 1-2 Escoria granallada

Fuente: FABCOM S.A.S

Escoria de Botadero: Esta escoria, se obtienen por proceso de enfriamiento lento, directamente en el lugar de acopio definitivo, donde esta disminuye su temperatura hasta alcanza la temperatura ambiente. Este tipo de tratamiento, facilita la cristalización de la material, reduciendo la porosidad y de alguna forma limitando la posibilidad de reacción en procesos posteriores. Se detectan menor porcentaje de absorción de agua y son más densas que las granalladas, como se puede ver en la Figura 1-3

Figura 1-3 Escoria de botadero

Fuente: mineriaenlinea.com

Escoria Expandida: es expandida por la aplicación de una cantidad controlada de agua, aire y vapor. La solidificación acelerada aumenta la porosidad produciendo un material ligero que es triturado para darle un mayor valor a las escorias como se puede apreciar en la Figura 1-4.

Figura 1-4 Escoria expandida

Fuente: FINEX TRADING LTD

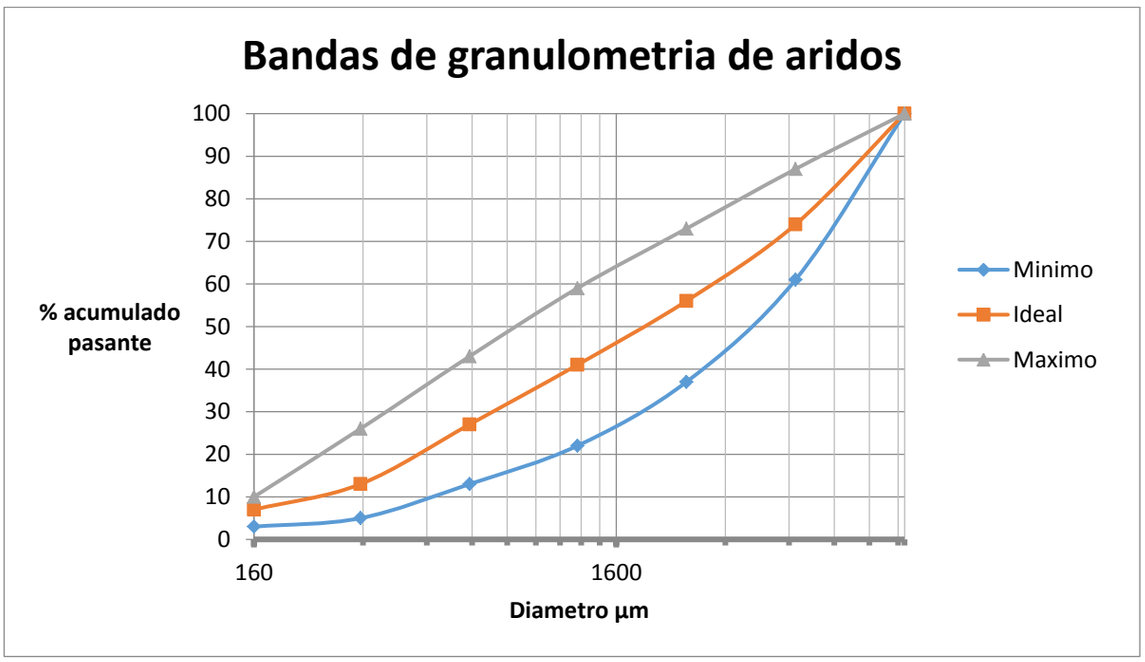
1.3 ESCORIA DE COBRE EN RELACION A LOS ARIDOS.

Ya definidas las principales características tanto de la arena como agregado fino, como de la escoria de cobre es necesario determinar los parámetros que esta deberá cumplir para poder presentarse como remplazo para la arena en la preparación de hormigón para la construcción de ladrillos de hormigón.

1.3.1 Bandas granulométricas.

Como se estableció en la primera parte de este capítulo, las características granulométricas con las que debe contar la escoria para remplazar a la arena deben ser bastante específicas, es por lo anterior que el gráfico 1-1 representa gráficamente las bandas entre las que se debe ubicar el análisis granulométrico a realizarse en la escoria de cobre para su uso como agregado fino según la norma NCh163

Gráfico 1-1 Bandas límites de áridos



Fuente: NCh 163, Of 79.

1.3.2 Densidad de la escoria de cobre.

Este segundo punto en la evaluación de la escoria nos hace considerar cual debe ser el tipo de escoria con el cual se debe trabajar, si evaluamos la influencia de la escoria como una parte sustancial de la gravedad especifica que obtendrá el producto final es

importante recalcar que mientras más similar sea la gravedad especifica de la arena y de la escoria, mayor serán las similitudes entre ambos productos finales. Según datos obtenidos las diferencias entre las densidad de ambos se muestra en la Tabla 1-5.

Tabla 1-5: Densidades arena y escoria de cobre.

	Arena	Escoria
Gravedad Especifica	2,65g/cm^3	3,33g/cm^3

Fuente: Biblioteca científica ScIELO

1.3.3 Estado de humedad de la escoria de cobre.

Luego de analizar los factores expuestos en el capítulo 1 de este trabajo, el último punto que se debe considerar para considerar la escoria de cobre como un remplazo posible a la arena como agregado fino en la fabricación de hormigón, es la determinación de la humedad que esta contiene dependiendo de su procedencia. La utilización de la Figura 1-1 ayudara a definir el estado de humedad que posee la escoria y de esta forma poder continuar con el siguiente paso correspondiente al cálculo de la dosificación de agua.

Tabla 1-6: Identificación de características requeridas.

Características requeridas	Arena	Escoria
Densidad	La densidad del árido según la NCh 165 debe ser menor a 3g/cm³	La escoria de cobre posee una densidad igual o superior a 3,33g/cm³
Granulometría	Entre el 100-95% de la arena debe ser menor a 5mm y tener una distribución dentro del (Grafico 1-1)	El 100% de la escoria se encuentra bajo los 5mm y por si sola no se encuentra dentro de las bandas del (Grafico 1-1)
Inocuidad en agua	La arena debe poseer un mínimo contenido de impurezas orgánicas y elementos solubles descritos en la (Tabla 1-1)	El Fabricante de la escoria para este caso certifica la insolubilidad y la nula presencia de elementos orgánicos en esta como se observa en el (Anexo 3)
Estado de humedad	Se encuentra en estado parcialmente seco por su almacenamiento y el agua contenida debe ser restada del agua de amasado	Se encuentra en estado parcialmente seco por su almacenamiento y el agua contenida debe ser restada del agua de amasado
Material fino	El material fino menor a 80 micrones debe ser menor al 5%	No posee material bajo los 300 micrones

Fuente: Norma NCh 163 y Norma NCh 165.

CAPITULO 2: DETERMINAR LA DOSIFICACION PARA LA FABRICACION DE LADRILLOS DE HORMIGON SEGUN LA NORMA NCH 170.

2.1 HORMIGONES.

2.1.1 Generalidades sobre hormigón.

La norma chilena NCh 170 [5]. Establece los requerimientos generales para la fabricación de hormigones de densidad entre 2 y 2,8 g/cm^3.

El hormigón es aquel material que resulta de la mezcla de agua, áridos, grava y cemento, eventualmente con aditivos y adiciones, aquellas que al fraguar y endurecer adquiere resistencia.

Comúnmente el hormigón se clasifica en grados con respecto a la resistencia a la compresión o a la flexotracción obtenida, para el caso de esta investigación y con el objetivo de ser usado en obras habitacionales, la resistencia a la compresión será el factor utilizado para la comparación de las diferentes probetas, además de comparar factores de absorción y capilaridad de agua.

2.1.2 Clasificación de hormigones.

El hormigón se clasifica con respecto a su resistencia específica a la compresión medida en probetas cubicas de 20cm de arista, de acuerdo a como establece la norma NCh 1037, a la edad de 28 días donde se ha demostrado que la resistencia a la compresión del hormigón alcanza su punto más alto y estable. En la tabla 2-1 se especifican las clasificaciones del hormigón según su resistencia a la compresión.

Tabla 2-1 Clasificación de hormigones por resistencia a la compresión

Grado	Resistencia especificada, f_c	
	MPa	(kgf/cm^2)
H5	5	(50)
H10	10	(100)
H15	15	(150)
H20	20	(200)
H25	25	(250)
H30	30	(300)
H35	35	(350)
H40	40	(400)
H45	45	(450)
H50	50	(500)

Fuente: Norma NCh 170

En algunos casos además de las exigencias establecidas a la resistencia a la compresión, se puede complementar con otros requisitos tales como la dosis de cemento utilizada, granulometría de los áridos utilizada, en caso de la edad de maduración ser distinta de 28 días en el momento de realizar las pruebas, esto también se debe establecer dentro de las especificaciones del producto.

2.1.3 Dosificación para hormigones.

La dosificación que se utilice específicamente en las obras o fabricación de los productos de hormigón, debe ser tal que el producto cumpla con las características específicas que se obtuvieron en su construcción a nivel de laboratorio. Es fundamental mencionar que la resistencia media requerida para un hormigón de características específicas debe ser mayor a la resistencia específica que le da su categoría al hormigón, en palabras simple un hormigón H20 en su utilización debe tener una resistencia a la compresión mayor a 20MPa.

Según la norma NCh 170 establece un numero de pasos sistemáticos los cuales se deben seguir para obtener la correcta dosificación de los elementos que componen el hormigón, estos pasos están especificados en el anexo C de la norma vigente y tienen como objetivo cumplir con la resistencia especificada y estimar la resistencia media de dosificación en la cual se basan los cálculos. Los pasos son;

- Determinación de la resistencia requerida.
- Determinación de la razón agua/cemento
- Determinación de Agua
- Determinación de Cemento
- Determinación de Aire
- Determinación de Áridos

Para la dosificación de los componentes se debe tomar una base de cálculo de $1m^3$ y sumar los componentes de la mezcla según la siguiente fórmula.

$$C + W + U + G + A = 1m^3$$

Dónde:

- C = Volumen de Cemento (m^3)
- W = Volumen de Agua (m^3)
- U = Volumen de Aire (m^3)
- G = Volumen de Grava (m^3)
- A = Volumen de Arena (m^3)

2.1.3.1 Determinación de la resistencia media requerida.

La resistencia media requerida tiene que ser mayor que la resistencia específica del proyecto, para poder compensar las diferencias aleatorias que se originan en las variaciones del proceso de fabricación (Procedimiento, materiales, etc...)

La resistencia media requerida se calcula según la expresión:

$$Fr(kgf/cm^2) = Fc + (t * s)$$

Dónde:

- Fr: Resistencia media requerida (kgf/cm^2)
- Fc: Resistencia especifica (kgf/cm^2)
- t: Factor de confianza (n)
- s: Factor de condiciones para la obra (kgf/cm^2)

Según el objetivo de esta investigación y con el ideal de obtener hormigón utilizable en obras habitacionales la selección de la resistencia específica es de 20Mpa como se muestra en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2 Elección del grado de hormigón

Grados de hormigón	Solicitación y exposición	Elementos estructurales		
		En masa	Armados	Pretensados
H5	Elementos poco solicitados y sin peligro de heladas	Cimientos corridos, emplantillados, etc.	-	-
H10	Elementos poco solicitados y con peligro de heladas	Muros de contención, radieres	-	-
H15 - H20	Elementos medianamente solicitados y con peligro de heladas	Elementos corrientes de la construcción, pavimentos, prefabricados		
H20 - H35	Elementos altamente solicitados con o sin peligro de heladas			
> H35		-	Elementos especiales de la construcción, prefabricados en taller	

Fuente: Norma NCh 170.

Luego para la determinación del factor de confianza, la norma se rige por los datos tabulados de la tabla 2-3 donde para obras en las cuales no se ha ensayado con anterioridad se debe tomar el menor factor de confianza correspondiente al 80% que entrega como resultado un factor t = 0,842

Tabla 2-3 Factor estadístico t

Nivel de confianza, %	t
95	1,645
90	1,282
85	1,036
80	0,842

Fuente: Norma NCh 170.

En la determinación del factor de condiciones para la obra la norma NCh 170 también establece una base de datos tabulados como se muestra en la tabla 2-4, pero en la cual establece las condiciones para contratistas que fabrican hormigón, para casos donde el fabricante del hormigón no posea experiencia, la norma establece textual. “Cuando no se disponga de resultados ni antecedentes del contratista, para cualquier nivel de resistencia especificada del proyecto adoptar el valor s = 8,0MPa” (NCh 170, 1985, Anexo C)

Tabla 2-4 Valor estimado

Condiciones previstas para la ejecución de la obra	s MPa	
	≤ H 15	> H 15
Regulares	8,0	-
Medias	6,0	7,0
Buenas	4,0	5,0
Muy buenas	3,0	4,0

Fuente: Norma NCh 170.

Finalmente para el cálculo de la resistencia media requerida se tomaron los datos de las tablas anteriores de esta sección y se remplazaron en la fórmula de tal manera que:

$$\boldsymbol{Fr} = \boldsymbol{Fc}\, kgf/cm^2 + (\boldsymbol{t} * \boldsymbol{s})kgf/cm^2$$
$$\boldsymbol{Fr} = 200kgf/cm^2 + (0{,}842 * 80)kgf/cm^2$$
$$\boldsymbol{Fr} = 267{,}36kgf/cm^2$$

2.1.3.2 Determinación razón agua-cemento.

Para la determinación de la razón agua-cemento por condiciones de resistencia existen 3 métodos posibles, el primer método consiste en un proceso en el cual se toma un registro de ensayos anteriores que contengan la dosificación propuesta para obtener la resistencia requerida, en este caso la resistencia se obtiene interpolando entre las características de una matriz de datos. El segundo método consiste en realizar diferentes probetas de hormigón de prueba con 3 razones de agua-cemento diferentes, de este modo se producirán diferentes resistencias en un intervalo que debe contener la resistencia requerida, para cada mezcla se deben construir 3 probetas que se ensayan a la edad de maduración de 28 días, luego y mediante un gráfico de dispersión se podrá interpolar la razón agua-cemento que corresponda.

El tercer método que es el que se utilizará en esta investigación corresponde a la determinación de la razón agua-cemento, mediante datos tabulados que establecen las proporciones y que se encuentran validados en la norma NCh 170 como se muestra en la tabla 2-5

Tabla 2-5 Razón agua-cemento para resistencia media requerida

Razón agua-cemento en masa	Resistencia media MPa
	Cemento grado corriente
0,45	34
0,50	29
0,55	25
0,60	21
0,65	18
0,70	16
0,75	14
0,80	12
0,85	10

Fuente: Norma NCh 170.

Es importante que la utilización de la tabla 2-5 tenga ciertas consideraciones, específicamente respecto a la humedad que debe poseer el árido para la utilización de esta tabla, como se especifica en el capítulo 1, el árido debe encontrarse superficialmente seco, pudiendo contener o no agua en sus poros, pero, esta debe ser considerada al momento de la dosificación de agua.

Sabiendo que la resistencia media obtenida en 2.1.3.1 es de 267,36kgf/cm^2 es necesario interpolar entre los datos de la tabla 2-5 para poder obtener la razón agua/cemento que corresponda a esta resistencia. El resultado de la interpolación se muestra en la tabla 2-6 entregando como resultado.

Tabla 2-6 Interpolación lineal razón agua-cemento

Resistencia Requerida Mpa	Razón Agua Cemento
29	0,5
25	0,55
Razón Agua/Cemento	0,53

Fuente: Norma Nch 170.

2.1.3.3 Dosificación de Agua.

Para determinar la dosificación de agua es necesario primero conocer la razón agua cemento con los datos obtenidos en el punto anterior, luego de esto y tomando en cuenta una docilidad media como establece la norma NCh 170 para los ensayos en probetas de hormigón, se debe utilizar la tabla 2-7 para poder determinar la dosificación de agua para una base de cálculo de $1m^3$.

Tabla 2-7 Volumen estimado agua de amasado (m^3)

Tamaño máximo nominal, mm	Docilidad				
	Baja	Media Baja	Media	Media Alta	Alta
63	0,135	0,145	0,155	0,165	0,170
50	0,145	0,155	0,165	0,175	0,180
40	0,150	0,160	0,170	0,180	0,185
25	0,170	0,180	0,190	0,200	0,205
20	0,175	0,185	0,195	0,205	0,210
12	0,185	0,200	0,210	0,220	0,230
10	0,190	0,205	0,215	0,230	0,240

Fuente: Norma NCh 170.

*La docilidad es un factor de diseño relacionado con las condiciones de la obra y la perdida de agua que sufre el hormigón desde su amasado, transporte y vaciado final, en condiciones de mucha humedad se recomienda una baja docilidad, mientras que para obras en las que predominan las altas temperaturas e intrincados moldajes se recomienda una mayor docilidad del hormigón.

Conociendo que nuestro tamaño máximo nominal (Apertura del tamiz inmediatamente inferior al que pasa el 100% del árido cuando por este pasa más del 90%), corresponde a 20mm y tomando una docilidad media del hormigón, lo anterior debido a que este no requiere condiciones especiales, entrega como resultado final que la determinación de la dosificación de agua es de $0{,}195m^3$ y esto corresponde a 195L de agua por $1m^3$ de hormigón.

2.1.3.4 Dosificación de Cemento

La dosificación de cemento se obtiene a partir del volumen de agua dividido en la razón agua/cemento, utilizando la densidad del agua como 1000kg/m^3 y mediante la fórmula:

$$mCemento(kg) = \frac{mAgua(kg)}{Razon\ agua/Cemento}$$

$$mCemento = \frac{195kg}{0{,}526 \sim 0{,}53}$$

$$mCemento = 370kg$$

2.1.3.5 Dosificación de Aire.

Para la dosificación de aire, la norma NCh 170 en el caso de los hormigones de grado corriente establece en la tabla 2-8 las cantidades de aire que se obtienen empíricamente dependiendo del diámetro nominal del árido y de esta forma se define el aire que se encontrara dentro del hormigón para cada caso.

Tabla 2-8 Aire promedio atrapado

Tamaño máximo nominal, mm	Volumen medio de aire atrapado, m^3
63	0,003
50	0,005
40	0,010
25	0,015
20	0,020
12	0,025
10	0,030

Fuente: Norma NCh 170.

De esta forma se determinó que para un diámetro nominal de 20mm en el árido, el volumen atrapado de aire será de 20L por m^3 de hormigón.

2.1.3.6 Dosificación de Áridos.

Para la dosificación del árido el estudio se enfoca en la norma NCh 163 en la cual se establecen los lineamientos generales de los áridos en el hormigón, aunque esta norma está dirigida a las arenas silíceas y las características que estas deben poseer, para este caso se sometió a la escoria al mismo proceso de validación con el objetivo de que cumpliera con las mismas características. Para obtener esta homologación los pasos son;

- Determinación de la densidad de los áridos Involucrados
- Determinación de las proporciones de arena y escoria
- Determinación de la granulometría Adecuada
- Determinación de la humedad de áridos
- Determinación de la proporción de áridos en masa.

a) Determinación de la densidad de áridos.

El primer requisito que debe cumplir el árido para satisfacer la norma NCh 163 es que debe cumplir con una densidad máxima de 3,0g/cm^3, para esto fue necesario realizar pruebas de densidad a todos los áridos involucrados mediante picnómetria [9] obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 2-9

Tabla 2-9 Densidades de áridos a utilizar a 20°C

Árido	Densidad 1	Densidad 2	Densidad 3	**ρ Promedio**
Arena	2,56g/cm^3	2,86 g/cm^3	2,53 g/cm^3	**2,65 g/cm^3**
Escoria	3,28 g/cm^3	3,57 g/cm^3	3,15 g/cm^3	**3,33 g/cm^3**
Grava	2,58 g/cm^3	2,62 g/cm^3	2,66 g/cm^3	**2,62 g/cm^3**

Fuente: Elaboración propia mediante picnómetro en laboratorio USM-JMC

Al evaluar la tabla 2-9 se puede observar al instante que la escoria posee una densidad mayor a la que la norma permite y es por esta razón que nace la necesidad de combinar la escoria con un árido menos denso, en este caso arena, para reducir la densidad de tal forma que se encuentre dentro de lo establecido por la norma.

b) Determinación de las proporciones de arena y escoria.

Al comienzo de esta investigación se realizó la incorrecta suposición de que el comportamiento de la densidad era lineal y se adoptó la siguiente fórmula que satisficiera para una densidad de 3g/cm^3

$$\left(d(escoria)\frac{g}{cm3} * X\%\right) + (d(arena)\frac{g}{cm3} * (1 - X\%) = \frac{3{,}0g}{cm3}$$
$$\frac{3{,}33g}{cm3} * X + \frac{2{,}65g}{cm3} * (1 - X) = \frac{3{,}0g}{cm3}$$
$$3{,}33X + 2{,}65 - 2{,}65X = 3{,}00$$
$$X = 0{,}5147 = 0{,}515 = 51{,}5\%$$

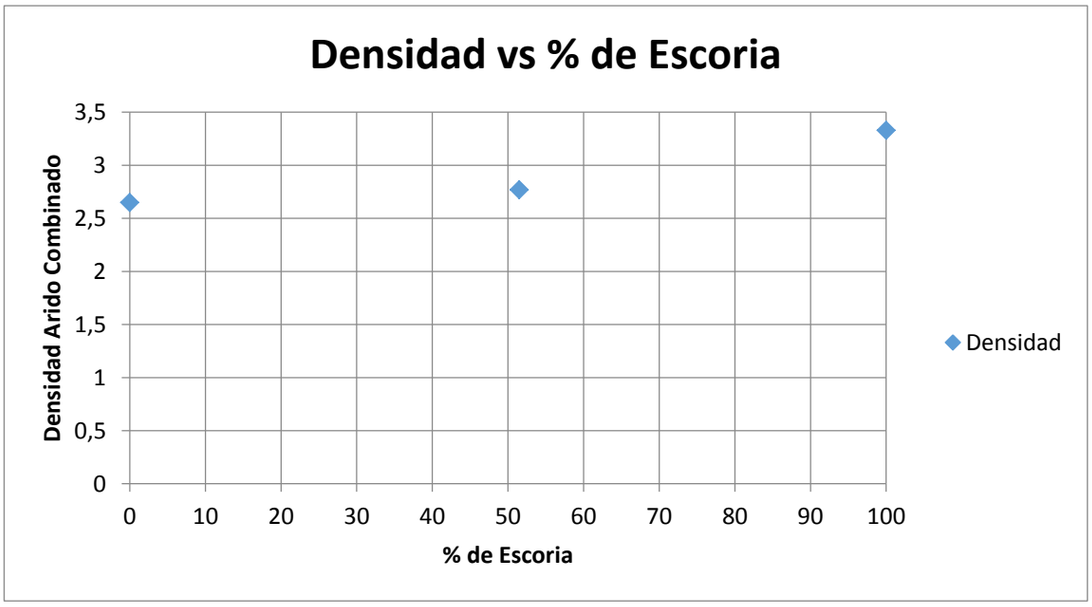
Esta ecuación respondía a un comportamiento lineal dentro de la densidad, remplazando en el valor de X% (porcentaje de escoria) en un 51,5% se obtenía que la densidad del árido combinado sería de 3g/cm^3.

Al llevar estas proporciones a los ensayos de laboratorio, el resultado obtenido fue sustancialmente diferente, obteniendo como resultado para estas proporciones (51,5% Escoria y 48,5% de arena) que la densidad resultante era de 2,77g/cm^3, si bien este resultado estaba dentro de lo que establece la norma NCh 163, una de las convicciones de esta investigación era remplazar la mayor cantidad posible de arena por escoria basándose en su densidad. El gráfico 2-1 muestra como este resultado erróneo sirvió para determinar 3 puntos de la curva de densidad los cuales representarían otro método para obtener las proporciones.

Figura 2-1: Picnometría realizada a muestras de arena

Fuente: Elaboración propia realizada en el laboratorio de metalurgia de la USM-JMC

Gráfico 2-1 Densidad vs % de escoria

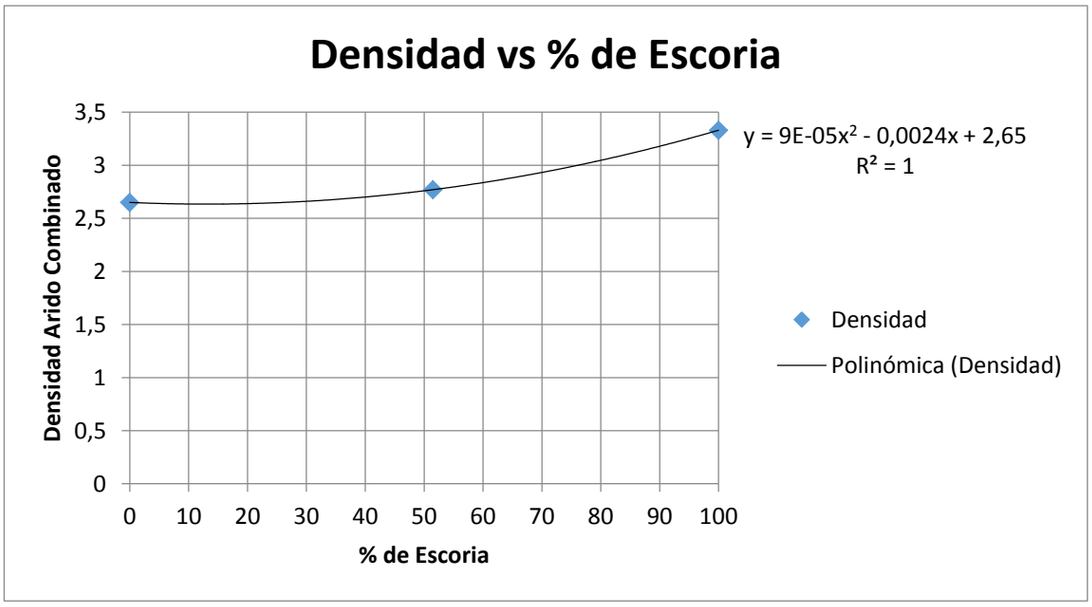


Fuente: Elaboración propia mediante picnometría.

Cada uno de los puntos en el grafico 2-1 representa 3 pruebas de picnómetria, cada punto entregando como resultado refleja el valor promedio de cada grupo de pruebas realizadas, si bien, si se presentara el grafico como un gráfico de dispersión con todos sus puntos en total estos serían 9, se deja constancia de que aumentar el número de pruebas con proporciones intermedias no utilizadas, aumentaría la exactitud de la formula final entregada, esto último no se realizó, ya que con 3 puntos se obtenía un resultado satisfactorio para lo esperado.

Al evaluar los 3 puntos obtenidos en el gráfico 2-1 se determinó que era necesario buscar una línea de tendencia que no fuera lineal ya que se había demostrado que esta no entregaba un resultado real. El criterio para escoger la línea de tendencia fue buscar aquella que tuviera la mayor correlación entre los datos basándose en el valor de R^2. Finalmente luego de un breve análisis, se determinó que una línea de tendencia polinómica de grado 2 (Función cuadrática) poseía la mayor correlación entre los datos, lo que permitiría interpolar el valor que esta función adoptará para una densidad igual a 3 g/cm^3, En el gráfico 2-2 se muestra como al aplicar la línea de tendencia polinómica esta permite obtener la ecuación de la parábola y así igualarla a un valor de 3g/cm^3 para obtener la proporción adecuada de escoria.

Gráfico 2-2 Elección línea de tendencia polinómica



Fuente: Elaboración propia mediante picnometría.

Al resolver esta ecuación cuadrática igualada a 3, podemos determinar los dos puntos de la parábola donde la función toma este valor, en la figura 2-2 se muestra cuáles fueron los resultados obtenidos.

Figura 2-2 Resolución de ecuación cuadrática

$$0.00009x^2 - 0.0024x + 2.65 = 3$$

$$0.00009x^2 - 0.0024x + 2.65 - 3 = 3 - 3$$

$$0.00009x^2 - 0.0024x - 0.35 = 0$$

$$x = \frac{0.0024 + \sqrt{0.00013176}}{0.00018}, x = \frac{0.0024 - \sqrt{0.00013176}}{0.00018}$$

Fuente: https://es.symbolab.com/solver/quadratic-equation-calculator/.

Al resolver esta ecuación obtenemos dos puntos donde la parábola pasa por Y=3, el primero es 77,1% de escoria y el segundo es -50,43% de escoria, como las proporciones no pueden adoptar valores negativos, se eligió el 77,1% de escoria como el valor a analizar y mediante picnometría fueron obtenidos los resultados que se muestran en la tabla 2-10.

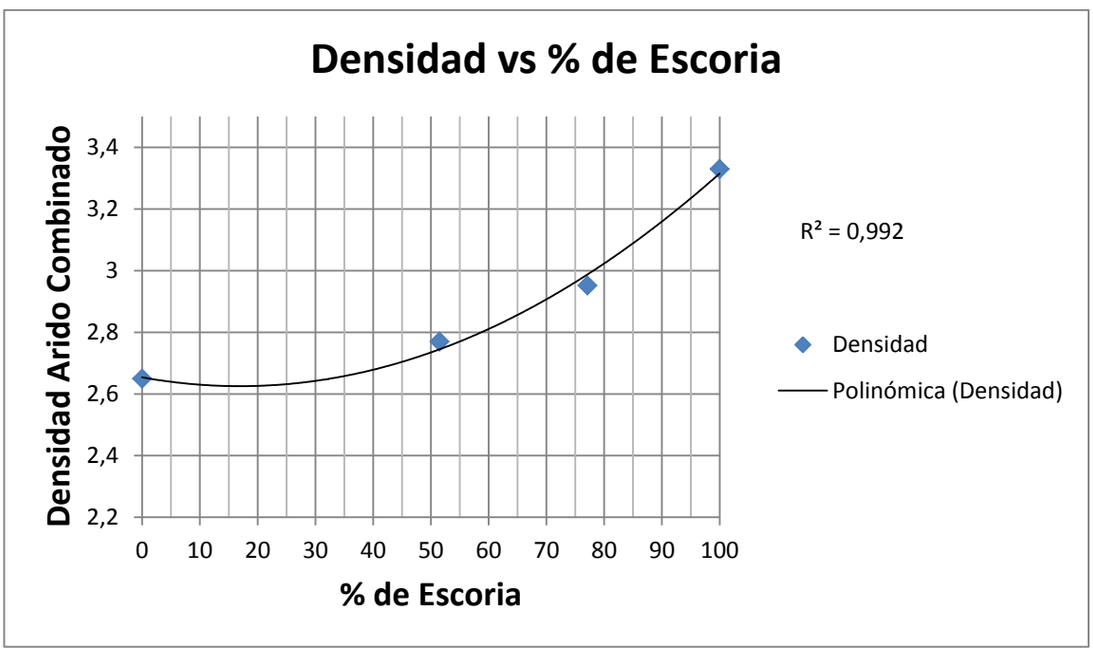
Tabla 2-10 Densidad para proporciones propuestas

% de Escoria	Densidad
0%	2,65g/cm³
51,5%	2,77 g/cm³
77,1%	2,952 g/cm³
100%	3,33 g/cm³

Fuente: Elaboración Propia mediante picnometría.

Al observar los datos obtenidos y encontrar una diferencia de 0,048g/cm^3 con el resultado obtenido, se puede adjudicar este error a las diferencias que se obtienen durante la medición de la densidad en 3 pruebas consecutivas, finalmente y para confirmar el resultado se volvió a graficar los resultados obtenidos, pero, para observar la variación en la correlación de los datos como se muestra en el gráfico 2-3

Gráfico 2-3 Variación en correlación de datos



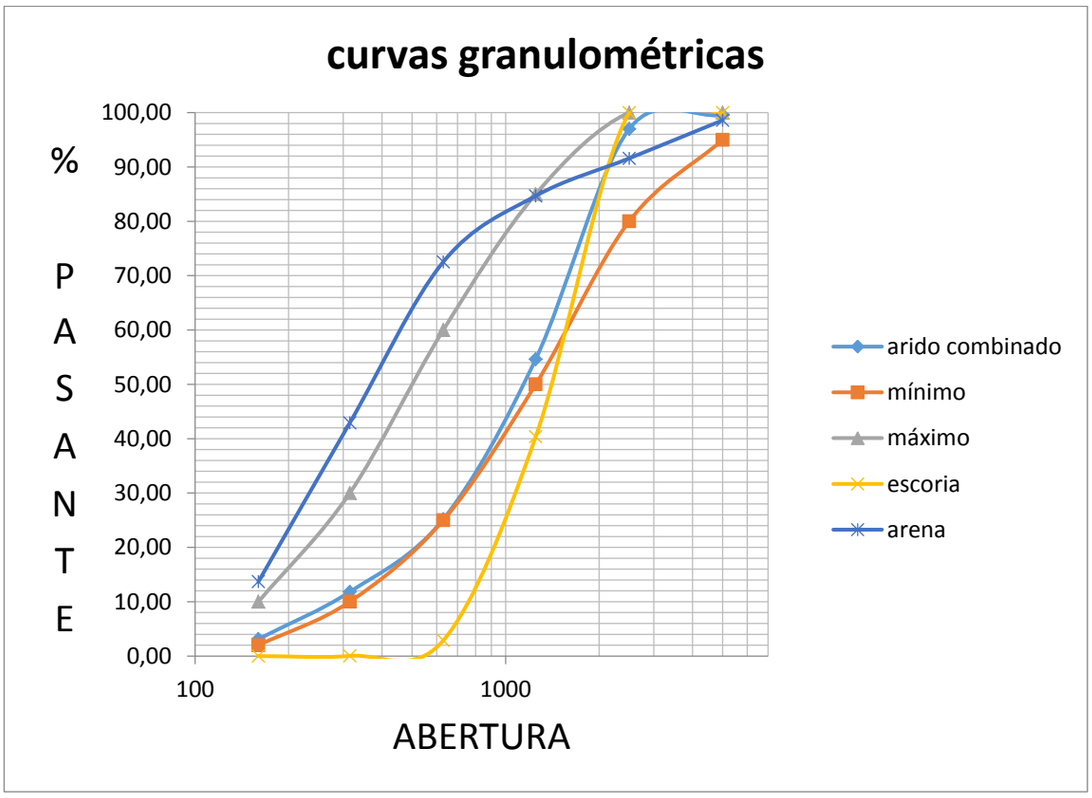
Fuente: Elaboración propia mediante picnometría.

Si se observa el gráfico 2-3 se puede apreciar que este nuevo punto en la curva genera un nuevo valor de R^2 = 0,992, este valor es lo suficientemente cercano a 1 para poder validar el resultado, determinando que las proporciones en masa del árido combinado deben ser de 77,1% de escoria y 22,9% de arena acorde con la NCh163.

c) Determinación de la granulometría adecuada.

El segundo requisito que establece la norma NCh 163 es la granulometría que el árido debe tener para ser utilizado en la fabricación de hormigón. Se hicieron 3 análisis para arena y escoria por separado, y 3 para árido combinado (tablas y gráficos en Anexo A) respetando las proporciones antes propuestas, los cuales fueron promediados y graficados para observar si las curvas se encontraban dentro de las bandas granulométricas mencionadas en el capítulo anterior, como se muestra a continuación en el gráfico 2-4.

Gráfico 2-4 granulometría de áridos estudiados

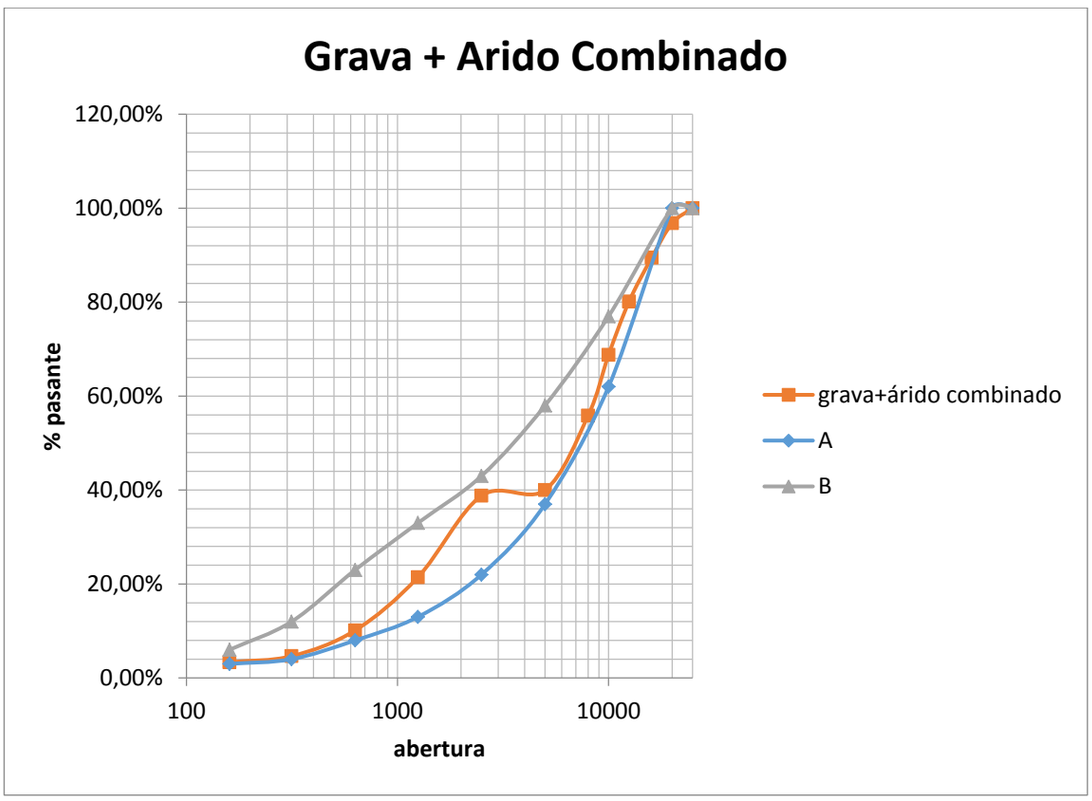


Fuente: Análisis granulométrico, Laboratorio de Metalurgia USM JMC.

Al observar el gráfico 2-4 se puede apreciar claramente que tanto la escoria como la arena salen de las bandas límites, siendo la primera más gruesa y la segunda un árido que clasifica como fino; pero combinando ambas se logra que la curva quede dentro de las bandas que especifican en el árido medio o normal recomendado por la norma NCh-163.

Por otro lado, en el anexo B de la norma NCh-163 se estipulan las bandas granulométricas que se deben cumplir para árido más grava según los distintos diámetros nominales. Es importante mencionar que tanto el fabricante como la norma recomiendan una proporción de 60% grava y 40% arena para que la curva no salga de los parámetros permitidos. Dicho esto se procede a graficar la curva arrojada en el análisis, la cual se encuentra entre sus dos bandas límites (siendo A el mínimo y B el máximo pasante) para un diámetro nominal de 20 mm, como se muestra en el gráfico 2-5.

Gráfico 2-5 Curva para grava más árido combinado



Fuente: Análisis Granulométrico, Laboratorio de Metalurgia USM JMC

Observando los datos expuestos, se puede afirmar que tanto las proporciones de escoria y arena propuestas en la letra b) como las proporciones de arena y grava recomendadas cumplen con la granulometría estimada para un árido medio o normal estipulado en la norma vigente.

d) Determinación de Humedad

La NCh 163 en su anexo C establece cuales son los estados de humedad y cuál es el adecuado para la dosificación del hormigón, este se denomina "Árido saturado superficialmente seco" y es utilizado ya que es en este estado en el que se encuentran la mayoría de los áridos almacenados a la intemperie. La importancia de la humedad en los áridos se basa en que el agua que está contenida dentro de estos debe ser restada de la dosificación de agua del hormigón para obtener la dosis adecuada. Para determinar esta agua es necesario tomar muestras desde la pila de árido y registrar su masa, a continuación secar la muestra en estufa entre 100°C-115°C durante 24 horas y luego realizar el pesaje de las muestras para conocer el contenido de agua, Obteniendo como resultado la tabla 2-11 en la cual se observan los porcentajes promedio de agua contenidos en los áridos.

Tabla 2-11 Humedad contenida en áridos

% De Humedad en Aridos				
Muestra	masa Humeda (g)	masa Seca (g)	Porcentaje De agua	Promedio
Arena				
1	30,53	30,2	1,08%	1,12%
2	22,29	22,04	1,12%	
3	12,89	12,74	1,16%	
Grava				
1	58,51	58,21	0,51%	0,51%
2	51,98	51,71	0,52%	
3	56,49	56,21	0,50%	
Escoria				
1	16,12	16,09	0,19%	0,14%
2	24,39	24,37	0,08%	
3	20,29	20,26	0,15%	
Arido Combinado				
1	10	9,96	0,40%	0,40%
2	10	9,95	0,50%	
3	10	9,97	0,30%	

Fuente: Prueba de humedad, Laboratorio de Metalurgia USM JMC.

Con la Información entregada en la tabla 2-11 es posible calcular que porcentaje en masa de los áridos corresponde a agua y poder restar esta cantidad de la dosificación de agua para cada caso.

e) Determinación de la proporción de áridos en masa.

Para la determinación de áridos en sus proporciones en masa debemos volver a evaluar la siguiente formula descrita en el punto 2.1.3, y ahora remplazar los datos obtenidos a lo largo de este capítulo.

$$C + W + U + G + A = 1m^3$$

Resumen:

- C = Volumen de cemento: Se obtiene de la dosificación de agua dividida por la razón agua/cemento y multiplicada por la densidad del cemento (Aproximadamente 3g/cm^3) quedando de la forma:

$$\frac{\frac{195Kg\ Agua}{0,526}}{3\ kg/L} = 123,57L\ Cemento$$

- W = Volumen de Agua: Resultado para una docilidad media y con un Tamaño máximo nominal de 20mm como se explica en el punto 2.1.3.3, se obtiene una dosificación de agua igual a 195L/m^3
- U = Obtenido según datos tabulado y explicado en el punto 2.1.3.5, para un Tamaño máximo nominal de 20mm se obtiene una dosificación de aire de 20L/m^3
- G + A = Definido como el volumen total de los áridos es igual a la sustracción de los otros tres factores a la base de cálculo de 1m^3 o 1000L como se muestra en la siguiente formula.

$$1000L - 123,57L(Cemento) - 195L(Agua) - 20L(Aire) = 661,4L(Arido)$$

Para la determinación de la dosis de áridos en masa. Esta investigación se basó en la fórmula para la dosificación de áridos propuesta por el ingeniero en construcción de la Universidad Austral “Jorge Alberto Arismendi Miranda” en su trabajo de título denominado “Influencia de fibras sintéticas de poliolefina, en la resistencia a la compresión y flexotración en hormigones grados H20, H25 y H30” [2]. De este trabajo se extrae la siguiente fórmula para la dosificación de áridos en masa.

$$mAridos = Varidos * \frac{\rho Af * \rho Ag}{(\%Af * \rho Ag) + (\%Ag * \rho Af)}$$

Dónde:

- ρAf: Densidad real árido fino ($\frac{kg}{L}$)
- ρAg: Densidad real árido grueso ($\frac{kg}{L}$)
- %Af: Porcentaje de árido fino en el árido total
- %Ag: Porcentaje de árido grueso en el árido total
- Varidos: Volumen total de áridos. (L)

Remplazando para Hormigón H20 con escoria:

$$mAridos(kg) = 661{,}4L * \frac{2{,}95kg/L * 2{,}62kg/L}{(40\% * 2{,}62kg/L) + (60\% * 2{,}95kg/L)}$$

$$mAridos = 1814{,}52kg$$

Obteniendo Como resultado para cada fracción

$$mArena = 1814{,}52kg * 40\% * 22{,}9\% = 166{,}21kg$$
$$mEscoria = 1814{,}52kg * 40\% * 77{,}1\% = 559{,}59kg$$
$$mGrava = 1814{,}52kg * 60\% = 1088{,}71kg$$

Remplazando para Hormigón H20 sin escoria:

$$mAridos(kg) = 661{,}4L * \frac{2{,}65kg/L * 2{,}62kg/L}{(40\% * 2{,}62kg/L) + (60\% * 2{,}65kg/L)}$$

$$mAridos = 1741{,}21, kg$$

Obteniendo Como resultado para cada fracción

$$mArena = 1741{,}21kg * 40\% = 696{,}48kg$$
$$mGrava = 1742{,}21kg * 60\% = 1045{,}32\ kg$$

2.1.4 Dosificación Final

Luego de evaluar todos los puntos expuestos en el capítulo 2 se procede a la construcción de las probetas según la norma NCh 1017 con las siguientes dosificaciones

que se muestran en la tabla 2-12 para Hormigón H20 sin escoria y en la tabla 2-13 para Hormigón H20 con árido combinado (Escoria/Arena).

Tabla 2-12 Dosificación para 1m^3 de hormigón estándar

Para 1m^3 H20 Sin escoria				
Volumen Agua de amasado (L)	Volumen Aire (L)	Arena 40% (Kg)	Grava 60% (Kg)	Cemento (kg)
195	20	696	1045	370

Fuente: Elaboración Propia mediante dosificación según NCh 170.

Tabla 2-13 Dosificación para 1m^3 de hormigón árido combinado

Para 1m^3 H20 Arido Combinado					
Volumen Agua de amasado (L)	Volumen Aire (L)	Arena 9,16% (Kg)	Grava 60% (Kg)	Cemento (kg)	Escoria 30,84% (Kg)
195	20	166	1089	370	560

Fuente: Elaboración Propia mediante dosificación según NCh 170.

Con esta información se construyen y se curan las probetas por 28 días para ser ensayadas en el capítulo 3.

CAPITULO 3: EVALUACIÓN DE PROBETAS DE HORMIGÓN H20 ESTÁNDAR Y ÁRIDO COMBINADO MEDIANTE PRUEBAS DE ABSORCIÓN, CAPILARIDAD Y ENSAYO DE COMPRESIÓN RESPECTO A LA NORMA NCH 182.

3.1 CONSTRUCCIÓN DE PROBETAS.

3.1.1. Construcción de moldes.

La construcción de probetas de hormigón es el método necesario para realizar los ensayos que permitan definir y comparar cuales son las características que tendrá el hormigón H20 cuando en él se ha remplazado el 77,1% de la arena por escoria.
La primera parte de la construcción de estas probetas es la fabricación de los moldes, estos están fabricados en Terciado Estructural de 9mm material que se muestra en la Figura 3-1.

Figura 3-1 Terciado estructural 9mm

Fuente: Ferretería imperial S.A

Este material se dimensiono en placas de 218mm para las bases, 2 paneles laterales de 218mm y los otros 2 paneles laterales internos de 200mm. Formando en su interior un cubo de 20mm de arista como establece la norma NCh 1017, la cual no establece el material del cual deben estar formados los moldes, pero si considera que estos no pueden estar sometidos a deformación en el momento del vaciado del hormigón en su interior.

Los paneles fueron atornillados usando tornillos de 1” desde la base y entre sus paredes laterales.

Posteriormente se utilizaron 2 capas de una película de aceite mineral SAE 20-50, para impermeabilizar la superficie del molde, ayudar como agente desmoldante según establece la norma NCh 1017, la primera capa se aplicó luego de la construcción de los moldes y la segunda capa horas antes del vaciado del hormigón dentro de los moldes.

3.1.2. Moldeado de probetas.

La norma NCh 1017 [7] establece que la superficie donde serán moldeadas las probetas debe ser el mismo lugar donde las probetas permanecerán en su curado inicial hasta el momento del desmolde, la base debe ser preparada y nivelada en un lugar que los proteja de vibraciones y golpes, para esto se escogió un área en el suelo y mediante el uso de un nivel como se muestra en la Figura 3-2, además de la utilización de cuñas para mantener nivelados los moldes en el suelo.

Figura 3-2 Nivel

Fuente: Ferretería imperial S.A

3.1.2.1 Colocación de Hormigón.

Se debe colocar el hormigón cuidadosamente como establece la misma norma, evitando que ocurra la segregación de los materiales componentes de la masada, para esto a medida que se agrega progresivamente el hormigón dentro del molde, se utiliza una varilla pisón la cual está formada de un segmento de acero tubular en el cual se pulieron sus puntas formando semicircunferencias y el cual es fundamental en el apisonamiento y compactación del material.

3.1.2.2 Compactación

Para el proceso de compactación la normativa vigente establece que podrán efectuarse 2 métodos de compactación los cuales son el apisonado por varilla pisón y el vibrado, ambos métodos dependen de la docilidad escogida y la dosificación que se detalla en el Capítulo 2. Para una docilidad media que fue la escogida para la realización

de esta investigación, el método utilizado es el de apisonado con varilla el cual se explica a continuación:

1. Para los moldes cúbicos, colocar el hormigón en dos capas de espesor similar
2. Por cada capa apisonar con la varilla pisón distribuyendo los golpes por toda el área del molde a razón de 32 golpes para una superficie de 400cm^2
3. Para la primera capa apisonar evitando que la varilla golpee el fondo del molde, para la segunda capa la varilla debe penetrar aproximadamente 2cm en el hormigón.

La aplicación de las capas se muestra en la Figura 3-3 siendo esta un ejemplo del proceso de moldeado.

Figura 3-3 Moldeado de hormigón

Fuente: Fabricación de hormigón, elaboración propia

3.1.2.3. Enrase.

El proceso de enrasado de las probetas se realizó según establece la norma, aplicando un movimiento de rasado desde el centro de la probeta hacia ambos lados, luego utilizando una plana se procede a alisar la superficie formando una superficie lisa como se muestra en la Figura 3-4.

Figura 3-4 Enrase de hormigón

Fuente: Fabricación de hormigón, elaboración propia.

3.1.2.4. Desmolde y marcado

Se realizó según la norma NCh 1017 un curado inicial de 20 horas, que se extendió a 48 horas debido a que la norma establece que las condiciones de endurecimiento deben permitir un desmolde que no cause daños a la probeta, este primer curado se efectuó con las probetas cubiertas por una lona plástica como establece la norma, además, se mantuvieron rodeadas por arena húmeda. Luego de tener las probetas desmoldadas se procedió a marcarlas utilizando un marcador permanente rotulando las probetas como H20 para hormigón corriente y AC para las probetas compuestas por el árido combinado, se marcaron las 10 probetas con su rotulo respectivo y se procedió al siguiente paso.

3.1.2.5. Curado.

Luego con las probetas marcadas se procede a una segunda etapa de curado, en la cual las probetas deben ser sumergidas en agua o tapadas con arena húmeda, que se mantenga así constantemente, este último proceso fue el que se realizó, cubriendo las probetas con arena silícea y regando la arena que las cubría de manera diaria. Tanto la norma NCh 1017 como la norma NCh 182 establecen que las probetas deben permanecer en este proceso de curado por un periodo igual o superior a 28 días antes de poder ser ensayadas en las diferentes pruebas de laboratorio.

3.2 ENSAYOS PARA BLOQUES DE HORMIGON.

La norma NCh 182 [6] determina cuales son los ensayos a realizar en el hormigón dependiendo de los diferentes usos que este tendrá, en este caso en particular por tratarse un hormigón para elementos prefabricados, los principales ensayos a realizar dependen de la resistencia a la compresión y los diferentes tipos de absorción de agua.

3.2.1 Ensayo de Absorción.

- Equipos: La balanza usada debe tener una sensibilidad dentro de 0,5 % de la masa de la probeta más pequeña ensayada, y debe tener una exactitud menor o igual que 1%.

- Probetas de ensayo: De las unidades muestreadas se deben usar tres bloques de tamaño completo que hayan sido marcados, medida su masa. Cuando los resultados se usen para determinar el contenido de humedad los ensayos se deben realizar en bloques de tamaño completo. Los ensayos se deben realizar en bloques de tamaño completo o probetas cortadas con sierra de bloques de tamaño completo. Los valores calculados para la absorción y densidad de las probetas de absorción de tamaño reducido se deben considerar como representativos del bloque completo

- Procedimiento:

  a) Saturación: Sumergir las probetas de ensayo en agua a una temperatura de 15ºC a 27ºC durante 24 h. Pesar las probetas mientras están suspendidas mediante un alambre metálico y completamente sumergidas en agua, y registrar la masa sumergida Wi (masa sumergida). Sacarlas del agua y dejarlas drenar durante 1 min colocándolas sobre una malla de alambre o tamiz, retirar el agua visible de la superficie con un paño húmedo, medir su masa y registrar como Ws (masa saturada).

  b)Secado: Después de la saturación, secar todas las probetas en un horno ventilado de 100 ºC a 115 ºC por 24 h o más y hasta que dos determinaciones sucesivas de masa muestren un incremento de pérdida menor o igual que 0,2 % de la masa medida previamente. Registrar la masa de las probetas secas como Wd (masa seca al horno).

- Calculo de la absorción:

Calcular la absorción como se indica:

$$absorcion \frac{kg}{m^3} = \left(\frac{Ws - Wd}{Ws - Wi}\right) * 1000$$

$$Absorcion\ \% = \frac{Ws - Wd}{Wd} * 100$$

Expresar los resultados de absorción al más próximo 1 kg/m3 o 0,1 % separadamente para cada bloque y como el promedio para los tres bloques.

En que:

Ws = masa saturada de la probeta, expresada en kilogramo
Wi = masa sumergida de la probeta, expresada en kilogramo.
Wd = masa seca al horno de la probeta, expresada en kilogramos.

3.2.2 Ensayo de Capilaridad.

- Equipos: Se debe disponer de los equipos siguientes: Balanza, Horno ventilado, Recipiente para alojar los bloques, Frascos de 250 ml para mantener un nivel constante de agua, Soportes regulables en altura, Regla graduada al mm, Cronómetro.

- Probetas de ensayo: Las mediciones se deben realizar en tres bloques completos.

- Procedimiento: Conservar los bloques 24 h en el laboratorio donde la temperatura debe ser de 23ºC ± 3ºC y con una humedad relativa menor que 75%. Medir la masa de cada uno de los bloques y numerarlos, colocar los bloques dentro del horno a 70ºC ± 5ºC, según su posición en obra de tal manera que el aire caliente circule sobre todas las caras. Secar los bloques hasta llegar a una masa constante; la masa se considera constante cuando dos mediciones sucesivas de masa efectuadas a 24 h de intervalo denotan una disminución de peso menor que 0,1% de la masa inicial. Dejar los bloques estabilizándose (reposando) dentro del laboratorio durante 6 horas. Medir la masa de cada bloque y registrar su valor como W0 (en gramos). Sumergir una cara de acabado liso de manera tal que quede 5 mm por debajo del nivel del agua. Para los bloques que

tengan superficie rugosa sobre las dos caras, tomar como plano de referencia el de la altura de inmersión con respecto al fondo de los huecos de la cara sumergida. Realizar esta inmersión colocando los bloques sobre soportes instalados dentro del fondo de los recipientes, de manera que el agua circule sobre la totalidad de la cara sumergida. Colocar los frascos rellenos de agua a fin de mantener un nivel de agua constante. Después de 10 min retirar cada bloque del agua y secarlo con un paño húmedo. Medir la masa y registrar su valor como W1 (en gramos), como se muestra en la Figura 3-5.

Figura 3-5 Ensayo de capilaridad

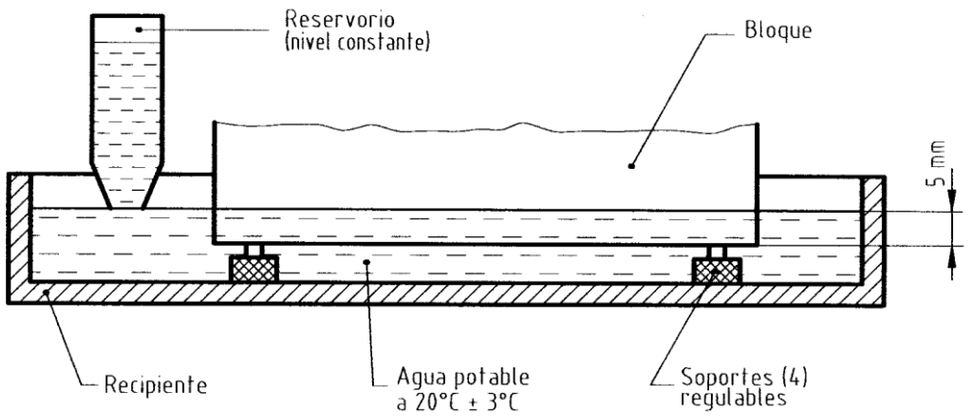


Figura 4 - Capilaridad - Esquema de ensayo

Fuente: Norma chilena NCh 182

- Calculo de la capilaridad: El coeficiente Cb de absorción de agua por capilaridad de cada probeta, está dado convencionalmente por la fórmula:

$$Cb = \frac{100W}{S\sqrt{t}}$$

En el que:

W= Masa de agua absorbida por el bloque durante el ensayo expresada en gramos.

S= Superficie de la cara sumergida expresada en centímetros cuadrados

t= Duración de inmersión del bloque expresada en minutos

3.2.3. Ensayo de Compresión.

- Equipos: La máquina de ensayo debe tener una exactitud de ± 1,0% sobre el valor de carga esperado, esto con el fin de no corregir los resultados de carga. El plato de contacto superior debe ser un bloque de metal endurecido, esféricamente asentado, fírmenmete atado en el centro de la cabeza superior de la máquina. El centro de la esfera debe descansar en el centro de la superficie apoyado en su asiento esférico, pero debe estar libre para girar en cualquier dirección , y su perímetro debe tener al menos 6 mm de holgura vertical desde la cabeza a las probetas acomodadas. El diámetro del plato de contacto superior debe ser al menos de 150 mm. Se puede usar un plato de apoyo de metal endurecido bajo la probeta para minimizar el deterioro del plato de contacto inferior de la máquina. Cuando el área de apoyo del plato de contacto superior o del plato de contacto inferior no es suficiente para cubrir el área de la probeta, se debe colocar entre el plato de contacto y la probeta cubierta, un único plato de apoyo de acero con un espesor igual a al menos la distancia desde el borde del plato de contacto hasta la esquina más lejana de la probeta

- Probetas de ensayo: De los seis bloques muestreados, tres se deben ensayar en compresión. Después de la entrega al laboratorio, almacenar (sin apilar y separados por no menos de 13 mm por todos lados) continuamente con aire a una temperatura de 24ºC ± 8 ° C y a una humedad relativa menor que 80 % y por un tiempo mayor o igual que 48 h. Los bloques usados para determinar el volumen neto (probetas para absorción) tienen el mismo volumen neto que los bloques usados para el ensayo de compresión. Los bloques de muestra para los ensayos de absorción y compresión deben ser del mismo tipo.

- Procedimiento: Al ensayar las probetas estas se deben encontrar con el centroide de sus superficies de apoyo alineadas verticalmente con el centro de empuje del plato de apoyo de la máquina de ensayo. Ensayar los bloques de hormigón que son 100 % sólidos en la misma dirección que en funcionamiento.

- Condiciones de humedad de las probetas: En el momento del ensayo de las probetas, éstas deben estar libres de humedad visible.

- Velocidad de ensayo: Aplicar carga hasta la mitad de la carga máxima esperada a cualquier tasa conveniente, después ajustar los controles de la máquina, según se requiera para tener una velocidad de carga uniforme de manera que la carga remanente sea aplicada durante un tiempo menor que 2 min y mayor o igual que 1 min . Registrar la carga máxima como Pmáx.

- Calculo de la compresión [8]: Se debe calcular la resistencia a la compresión sobre el área neta según la siguiente formula: Resistencia a la compresión sobre un área neta.

$$\mathrm{MPa} = \frac{\mathrm{Pmax}}{\mathrm{An}}$$

Calcular la resistencia a la compresión con un margen de 0,1MPa separadamente para cada probeta y tomar como valor final el valor promedio de las 3. Dónde:

Pmax: carga máxima de compresión expresada en kgf
An: Área promedio de la muestra expresada en centímetros cuadrados.

3.3 RESULTADOS DE ENSAYO.

3.3.1 Resultados Ensayo de Compresión.

Si bien los resultados obtenidos en el ensayo de compresión no son idóneos como se explica en el Anexo B, esto debido a ciertas observaciones que se realizaron al proceso de modelado de las probetas. Los resultados si son comparables y representativos ya que se sometió a las mismas condiciones tanto a probetas que contenían solo arena como a las probetas que poseían el árido combinado de escoria y arena.

Se realizó el ensayo en 6 probetas cubicas cumpliendo con la norma NCh 1017 y NCh 182, las 3 primeras probetas correspondían a Hormigón sin escoria y las 3 posteriores probetas identificadas como “AC” correspondieron a las probetas que estaban compuestas por arena y escoria como se explica en el Capítulo 2

A continuación se muestra el cálculo de la resistencia a la compresión en cada una de las probetas de hormigón para finalmente comprar los datos obtenidos.

3.3.1.1 Probetas de hormigón estándar.

1. Probeta 1

Masa: 18.130g
Pmax: 35.220kgf
An: 400cm^2

$$\text{MPa} = \frac{35.220\text{kgf}}{400\text{cm}^2}$$

$$MPa = 88{,}05\, {}^{kgf}/_{cm^2}$$

$$MPa = 88{,}05\, {}^{kgf}/_{cm^2} * \frac{1MPa}{10{,}1971\, {}^{kgf}/_{cm^2}}$$

$$MPa = 8{,}635MPa$$

2. Probeta 2

Masa: 18.230g

Pmax: 36.990kgf

An: 400cm^2

$$\text{MPa} = \frac{36.990\text{kgf}}{400\text{cm}^2}$$

$$MPa = 92{,}475\, {}^{kgf}/_{cm^2}$$

$$MPa = 92{,}475\, {}^{kgf}/_{cm^2} * \frac{1MPa}{10{,}1971\, {}^{kgf}/_{cm^2}}$$

$$MPa = 9{,}068MPa$$

3. Probeta 3

Masa: 18.210g

Pmax: 37.220kgf

An: 400cm^2

$$\text{MPa} = \frac{37.220\text{kgf}}{400\text{cm}^2}$$

$$MPa = 93{,}05\, {}^{kgf}/_{cm^2}$$

$$MPa = 93{,}05\, {}^{kgf}/_{cm^2} * \frac{1MPa}{10{,}1971\, {}^{kgf}/_{cm^2}}$$

$$MPa = 9{,}125MPa$$

3.3.1.2 Probetas de hormigón árido combinado.

1. Probeta 1

Masa: 18.670g

Pmax: 44.550kgf

An: 400cm^2

$$\text{MPa} = \frac{44.550\text{kgf}}{400\text{cm}^2}$$

$$MPa = 111{,}375\,{}^{kgf}/_{cm^2}$$

$$MPa = 111{,}375\,{}^{kgf}/_{cm^2} * \frac{1MPa}{10{,}1971\,{}^{kgf}/_{cm^2}}$$

$$MPa = 10{,}922MPa$$

2. Probeta 2

Masa: 18.800g

Pmax: 38.400kgf

An: 400cm^2

$$\text{MPa} = \frac{38.400\text{kgf}}{400\text{cm}^2}$$

$$MPa = 96\,{}^{kgf}/_{cm^2}$$

$$MPa = 96\,{}^{kgf}/_{cm^2} * \frac{1MPa}{10{,}1971\,{}^{kgf}/_{cm^2}}$$

$$MPa = 9{,}414MPa$$

3. Probeta 3

Masa: 18.640g

Pmax: 39.340kgf

An: 400cm^2

$$\text{MPa} = \frac{39.340\text{kgf}}{400\text{cm}^2}$$

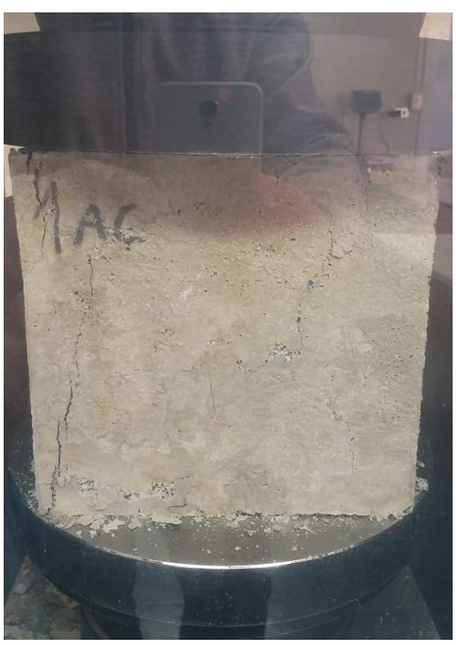
$$MPa = 98{,}35\,{}^{kgf}/_{cm^2}$$

$$MPa = 98{,}35\,{}^{kgf}/_{cm^2} * \frac{1MPa}{10{,}1971\,{}^{kgf}/_{cm^2}}$$

$$MPa = 9{,}645MPa$$

Los ensayos se realizaron gracias a la colaboración del departamento de construcción de la Universidad Técnica Federico Santa María, si bien la carga inicial no pudo ser del 50% de la resistencia especificada ya que el equipo operaba aplicando un gradiente de carga de 3kgf/cm^2/s, valores que no fueron modificados por recomendación del laboratorio de construcción, una de las realizaciones del ensayo se muestra en la Figura 3-6

Figura 3-6 Ensayo De Compresión



Fuente: Laboratorio de Construcción, USM JMC.

Luego de la realización de los ensayos las probetas quedan destruidas y es posible apreciar la composición interna que tienen ambos tipos de probetas, esta muestra la disposición que poseen los áridos y componentes dentro de los bloques de hormigón como se aprecia en la Figura 3-7 para el hormigón estándar y el hormigón con árido combinado.

Figura 3-7 Bloques de Hormigón estándar y árido combinado ensayados

Fuente: Ensayo de compresión, Laboratorio de Construcción USM JMC.

Al observar los datos obtenidos luego de la realización del ensayo de compresión se puede sintetizar en la Tabla 3-1 que los valores obtenidos para bloques de hormigón con escoria son superiores a los resultados obtenidos para bloques de hormigón estándar, es por esto que se considera el resultado obtenido como positivo para esta investigación.

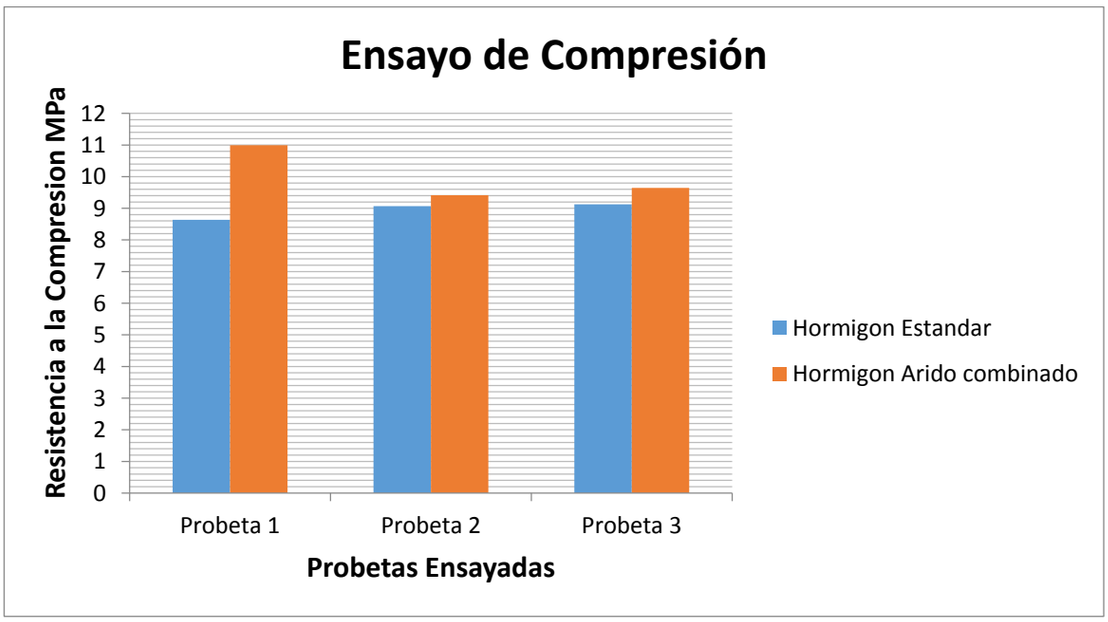
Tabla 3-1 Resumen resultados ensayo de compresión

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 1 AC	Probeta 2 AC	Probeta 3 AC
Resistencia (Mpa)	8,635	9,068	9,125	10,992	9,414	9,645
Promedio (MPa)	8,943			10,017		

Fuente: Ensayo de compresión, Laboratorio de Construcción USM JMC.

Según lo establecido en la NCh 182, el valor que se debe utilizar es el valor promedio de un mínimo de 3 ensayos de compresión para cada tipo de probeta, como se muestra en la tabla anterior, en estos resultados se puede observar un aumento del 12% en la resistencia a la compresión utilizando el árido combinado para la fabricación del hormigón. Finalmente en el Grafico 3-1 se observa gráficamente la comparación del ensayo de compresión realizado en las 6 Probetas, pudiendo observar que en todos los ensayos realizados el resultado utilizando el árido combinado es mayor.

Gráfico 3-1 Resistencia a la Compresión

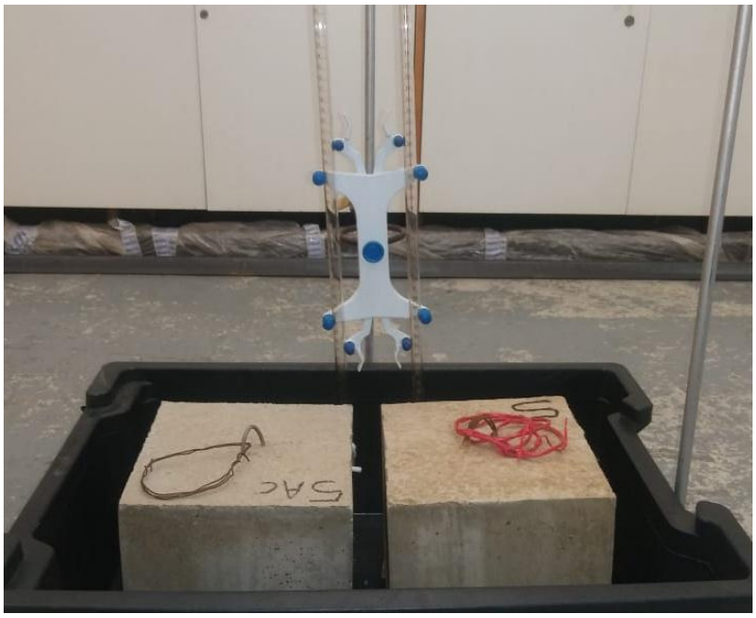


Fuente: Ensayo de compresión, Laboratorio de Construcción USM JMC.

3.3.2 Resultados Ensayo de Capilaridad.

El ensayo de capilaridad se realizó en 2 probetas iguales de 8 litros aproximadamente, una compuesta por el denominado hormigón árido combinado o "AC" y otra compuesta por el hormigón estándar que tiene solo la diferencia en el árido dentro de su composición. El ensayo se realizó rigurosamente basado en el procedimiento establecido por la NCh 182, la realización de este ensayo se explica en el punto 3.2.2 y tiene como objetivo obtener el coeficiente de absorción de agua por capilaridad o Cb. La ejecución de este ensayo se muestra en la Figura 3-8 realizado en el laboratorio.

Figura 3-8 Ensayo De Capilaridad



Fuente: Laboratorio de Metalurgia, USM JMC.

3.3.2.1 Determinación del coeficiente Cb.

El objetivo del ensayo de capilaridad es la obtención del coeficiente de absorción de agua por capilaridad "Cb", este coeficiente no tiene un valor predeterminado establecido en la norma, lo que se puede deber a los diferentes requerimientos que se establecen para cada edificación, aun así, dentro del estudio realizado se pueden asociar daños relacionados al fenómeno de absorción por capilaridad ya sea por la incorporación de contaminantes en el agua o por el daño que puede realizar al hormigón armado la absorción constante de agua. El cálculo del coeficiente Cb se muestra a continuación.

$$Cb = \frac{100W}{S\sqrt{t}}$$

Dónde:

W: Diferencia de masa entre la probeta seca y luego del ensayo (g).

S: Superficie de la cara de contacto correspondiente a 400 (cm^2)

t: Tiempo de duración correspondiente a 10 minutos con 38 segundos (min).

1. Determinación del Cb en Hormigón estándar.

$$Cb = \frac{100 * (17051{,}3g - 16965g)}{400cm^2\sqrt{10{,}6333min}}$$

$$Cb = \frac{100 * 86{,}3g}{1304{,}35cm^2\sqrt{min}}$$

$$Cb = \frac{8630g}{1304{,}35cm^2\sqrt{min}}$$

$$Cb = 6{,}62g/cm^2\sqrt{min}$$

2. Determinación del Cb en Hormigón con árido combinado (Escoria).

$$Cb = \frac{100 * (17584{,}7g - 17512g)}{400cm^2\sqrt{10{,}6333min}}$$

$$Cb = \frac{100 * 72{,}7g}{1304{,}35cm^2\sqrt{min}}$$

$$Cb = \frac{7270g}{1304{,}35cm^2\sqrt{min}}$$

$$Cb = 5{,}57g/cm^2\sqrt{min}$$

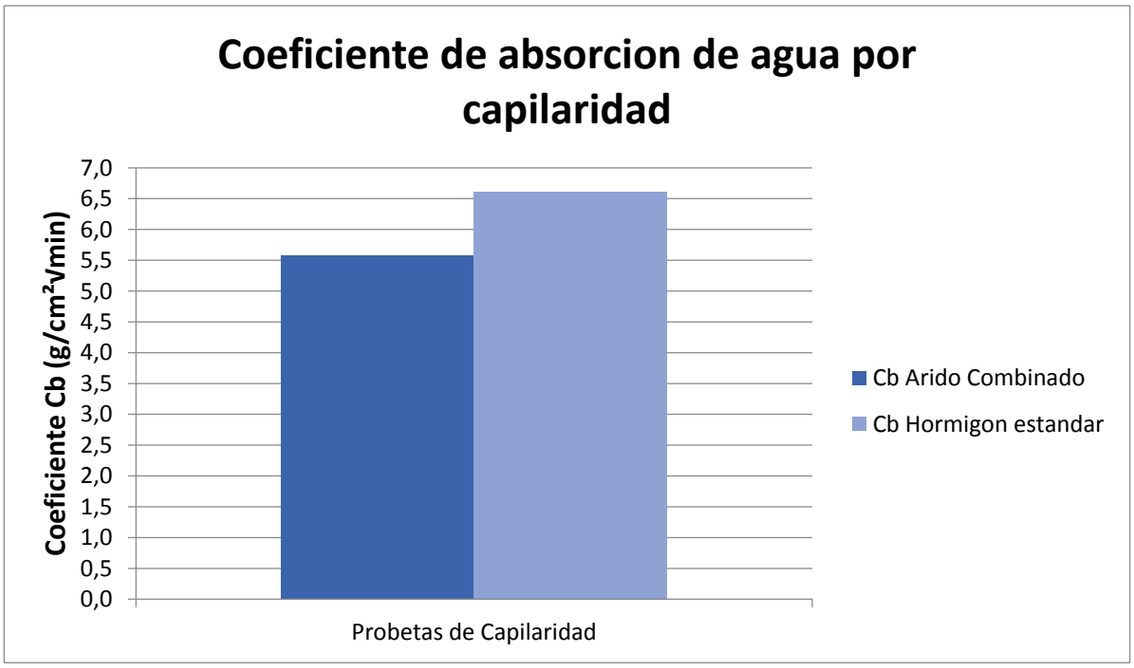
De los resultados obtenidos en el ensayo de capilaridad respecto al coeficiente Cb se puede observar una diferencia de 1,05g/cm^{2}min^{0,5} en la cual el hormigón con árido combinado y con presencia de escoria posee una menor capilaridad que el hormigón estándar, este resultado se muestra en la Tabla 3-2 y compara en el Grafico 3-2 mostrando así la diferencia existente, este resultado se considera positivo para la investigación ya que la alta capilaridad está asociada a la absorción de contaminantes en el hormigón.

Tabla 3-2 Resumen resultados ensayo Capilaridad

Coeficiente de Absorcion Por Capilaridad (Cb)		
Hormigon Estandar	7,19kg/m²√s	6,62g/cm2√min
Hormigon AC	8,54kg/m²√s	5,57g/cm2√min

Fuente: Ensayo de capilaridad, Laboratorio de Metalurgia USM JMC.

Gráfico 3-2 Coeficiente de absorción por capilaridad.



Fuente: Ensayo de capilaridad, Laboratorio de Metalurgia USM JMC.

3.3.3 Resultados Ensayo de Absorción.

Finalmente el ensayo de absorción de agua se realizó en paralelo al ensayo de capilaridad utilizando 2 probetas cúbicas de las mismas dimensiones y de acuerdo a la norma NCh 182 y como se explica detalladamente en el punto 3.2.1, siempre con el objetivo de comparar la absorción de agua que ocurre en probetas de hormigón estándar y las probetas realizadas en esta investigación utilizando un hormigón con escoria en remplazo a la arena, la realización de este ensayo se muestra en la Figura 3-9.

Figura 3-9 Ensayo de Absorción.

Fuente: Laboratorio de Metalurgia, USM JMC

3.3.3.1 cálculos ensayo de absorción.

El ensayo de absorción entrega dos resultados fundamentales que deben ser presentados, el primero es la absorción de agua por m^3 expresada en Kg y el segundo resultado es la absorción de agua porcentual en relación a la masa saturada y la masa secada posteriormente de las probetas. El primer resultado está definido por la ecuación:

$$absorción \frac{kg}{m^3} = \left(\frac{Ws - Wd}{Ws - Wi}\right) * 1000$$

Y el segundo resultado respecto a la absorción porcentual está dado por la ecuación:

$$Absorcion\ \% = \frac{Ws - Wd}{Wd} * 100$$

Para ambas ecuaciones se cumple que:

Ws = masa saturada de la probeta, expresada en kilogramo

Wi = masa sumergida de la probeta, expresada en kilogramo.

Wd = masa seca al horno de la probeta, expresada en kilogramos.

En el caso de la Absorción de agua por m^3

1. Probeta Hormigón Estándar.

$$absorción\frac{kg}{m^3} = \left(\frac{18{,}3399kg - 17{,}6463kg}{18{,}3399kg - 10{,}3325kg}\right) * 1000$$

$$absorción\frac{kg}{m^3} = \left(\frac{0{,}6936kg}{8{,}0074kg}\right) * 1000$$

$$absorción\frac{kg}{m^3} = (0{,}086619) * 1000$$

$$absorción = 86{,}61kg/m^3$$

2. Probeta Hormigón Árido Combinado.

$$absorción\frac{kg}{m^3} = \left(\frac{18{,}6686kg - 18{,}2766kg}{18{,}6686kg - 10{,}7225kg}\right) * 1000$$

$$absorción\frac{kg}{m^3} = \left(\frac{0{,}392kg}{7{,}9461kg}\right) * 1000$$

$$absorción\frac{kg}{m^3} = (0{,}049332) * 1000$$

$$absorción = 49{,}33kg/m^3$$

Para el caso de la Absorción Porcentual

1. Probeta de Hormigón estándar.

$$Absorción\ \% = \frac{Ws - Wd}{Wd} * 100$$

$$Absorción\ \% = \frac{18{,}3399kg - 17{,}6463kg}{17{,}6463kg} * 100$$

$$Absorción\ \% = \frac{0{,}6936kg}{17{,}6463} * 100$$

$$Absorcion\ \% = 3{,}93\%$$

2. Probeta de Hormigón árido combinado.

$$Absorción\ \% = \frac{Ws - Wd}{Wd} * 100$$

$$Absorción\ \% = \frac{18{,}6686kg - 18{,}2766kg}{18{,}2766kg} * 100$$

$$Absorción\ \% = \frac{0{,}392kg}{18{,}2766kg} * 100$$

$$Absorción\ \% = 2{,}14\%$$

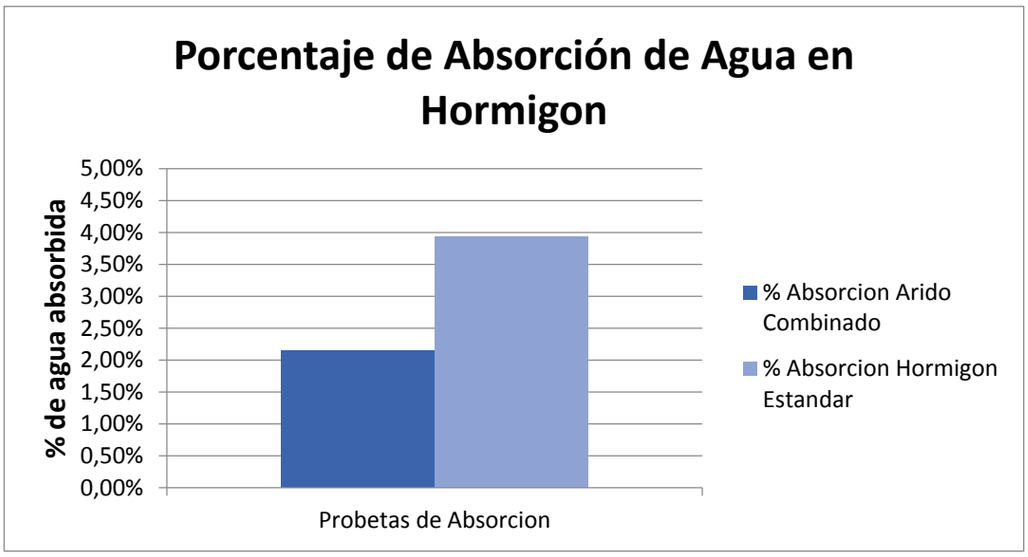
Para el primer caso de la absorción de agua por metro cúbico, se puede apreciar una diferencia de 37,28l/m^3. Mientras que para el caso de la absorción porcentual se obtiene como resultado una diferencia correspondiente a 1,79%, en ambos casos el hormigón que tiene el remplazo de arena por la escoria entrega valores menores respecto a la absorción de agua por saturación como se muestra en la Tabla 3-3 y para el caso de la absorción porcentual queda visible en el Grafico 3-3, se considera este resultado obtenido muy favorable, ya que mientras menor sea la absorción de agua que sufra el hormigón, mayor será su integridad y el tiempo de vida de este, ya que se mantendrá a salvo de contaminaciones exógenas.

Tabla 3-3 Resumen resultados ensayo Absorción

	Hormigon Estandar	Hormigon AC
Absorción Porcentual	3,93%	2,14%
Absorción por m3	86,61Kg/m3	49,33Kg/m3

Fuente: Ensayo de absorción, Laboratorio de Metalurgia USM JMC.

Gráfico 3-3 Coeficiente de absorción Porcentual.



Fuente: Ensayo de absorción, Laboratorio de Metalurgia USM JMC.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como se explica en el Capítulo 1, las características que debe cumplir la escoria de cobre para remplazar a la arena son; granulometría, densidad, humedad, material fino y la insolubilidad de esta, estos factores se resumen en la Tabla (1-6). El primer factor, granulometría, es establecido en la NCh 163 y se muestra en la Figura 1-1, estas bandas reflejan los límites permisibles en la granulometría de los áridos finos. El segundo factor determinante es la densidad, que como establece la NCh 165 debe ser menor a 3g/cm^3, este no es cumplido por la escoria según la investigación bibliográfica. Presentando un desafío en paralelo el cual es combinar arena y escoria en proporciones tales que la densidad de la mezcla sea menor a 3g/cm^3. El tercer factor de humedad está relacionado directamente con la dosificación de agua en la fabricación de hormigón, y aunque no es un factor determinante debe ser incluida el agua presente en el árido y restada de la dosificación de hormigón, ambos áridos se encuentran en un estado parcialmente seco. La cuarta característica se relaciona al material fino en el cual, tan solo un 5% puede ser menor a los 80 micrones, y finalmente la quinta característica que se debe cumplir es la insolubilidad de la escoria, factor que no fue motivo de investigación ya que en el Anexo 3 el fabricante de esta la certifica como insoluble en agua.

Para la determinación de la dosificación en la fabricación de ladrillos de hormigón, el primer paso fue la selección del grado de este, el cual se estableció según la norma para elementos de hormigón prefabricados, obteniendo una resistencia especificada de 20MPa (Tabla 2-2). Luego y con el grado seleccionado se debió solucionar el problema de densidad mencionado en el capítulo 1, para esto la metodología fue el uso de una interpolación polinómica cuadrática que satisficiera 3 puntos obtenidos empíricamente en la curva de densidad, de esta forma se obtuvo una proporción de 77,1% de escoria y 22,9% de arena, esto entregó como resultado una densidad de árido de 2,95g/cm^3 (Tabla 2-10). Si bien este método no está avalado bibliográficamente, fue verificado en el laboratorio de la USM JMC y funcionó para este caso en particular. Luego de la realización del estudio granulométrico a un nivel de laboratorio, se determinó que la escoria por si sola se encontraba fuera de las bandas granulométricas, para esto se utilizó arena fina, obteniendo como resultado un árido combinado, que se encuentra dentro de las bandas granulométricas para un árido de granulometría media (Grafico 2-5). Tanto el volumen de agua, aire y cemento se obtuvieron según los pasos sistemáticos establecidos en la NCh 170, siendo los 3 valores constantes para ambos tipos de hormigón (estándar y árido combinado). Posteriormente la masa de árido que se desempeñó como la condición variante en esta investigación, se determinó mediante la ecuación para dosis de árido con un volumen constante de

661,4l/m^3, donde la variación se produjo por las diferentes densidades de los áridos, tanto fino y combinado. Finalmente y como dicta la norma se generó una dosificación de hormigón para una base de cálculo de 1m^3 (dosificación que se dividió en 25 para obtener un Batch de 40L que permitiera la construcción de 5 probetas) y para una resistencia específica de 20MPa, obteniendo como resultado para el hormigón estándar la dosificación propuesta en la Tabla 2-12 y para el hormigón con árido combinado la Tabla 2-13. Cabe mencionar que con estas dosificaciones se procedió a la construcción de las probetas explicada en el anexo 2, momento en el cual se realizó la sustracción del agua presente en el árido al agua de amasado.

En la síntesis a lo largo de esta investigación se llegó a la construcción de 10 probetas de hormigón para ser evaluadas, 5 fabricadas con un hormigón estándar basado en la NCh 170 y 5 probetas con una variación en la composición del árido. Los ensayos seleccionados para esta evaluación fueron: Compresión, Absorción y Capilaridad, cada uno seleccionado para comparar las diferencias más relevantes en la construcción de elementos prefabricados de hormigón, desde la resistencia a la compresión exigida por la norma NCh 170 hasta los índices de absorción de agua que comprometen la filtración de contaminantes y posterior degradación del hormigón y sus propiedades. Al evaluar los ensayos de compresión realizados se observó que los resultados obtenidos no fueron los esperados, en relación a la resistencia especial del hormigón, mientras se esperaba obtener una resistencia mínima de 20MPa, finalmente se obtuvo una resistencia promedio de 8,943MPa para el hormigón estándar y una resistencia de 10,017MPa para el hormigón con árido combinado, aunque estas magnitudes distan bastante de las esperada, ya sea porque esto se debió al procedimiento de mezclado o almacenamiento del cemento, esta investigación considera que cualquier factor perjudicial lo fue para ambos casos, permitiendo de esta forma comparar de igual manera los resultados. Al evaluar la resistencia a la compresión en ambos tipos de probetas se observó que las probetas compuestas por el árido combinado poseían una resistencia a la compresión un 12% superior a su contraparte, se considera que este resultado es positivo a la investigación, ya que se obtuvieron valores superiores en cada ensayo que se realizó en las probetas que contenían el árido combinado. Al evaluar la capilaridad de las probetas mediante el coeficiente de absorción de agua por capilaridad “Cb” como lo establece la norma NCh 182, se obtuvieron resultados en absorción por capilaridad de 6,62g/cm^2 para el hormigón estándar y de 5,57g/cm^2 para el hormigón con árido combinado, ensayo que duro aproximadamente 10 minutos. Al observar la diferencia de 1,05g/cm^2 menos que arrojo el hormigón con árido combinado, se puede concluir que la presencia de escoria produjo una disminución en la absorción capilar de agua, lo anterior se considera favorable para la permanencia de las propiedades de este hormigón en el

tiempo por sobre el hormigón estándar. Finalmente se evaluó la absorción de agua por saturación tanto porcentual como en la cantidad de kg/m^3 de agua, esto entregó como resultado una absorción porcentual del 3,93% en peso para el hormigón estándar y del 2,14% para el hormigón con árido combinado, nuevamente la absorción de agua fue menor, en este caso en un 1,79% con la presencia de escoria, mientras que en caso de las absorción en kg/m^3 de agua la diferencia parece ser aún más relevante, al obtener 86,61kg/m^3 de agua en el hormigón estándar y de 49,33kg/m^3 de agua en el hormigón con árido combinado, esta diferencia de 37,28kg/m^3 de agua nos permite concluir: la absorción de agua en el hormigón con presencia de escoria es menor, esto contribuirá en mantener y proteger la integridad del hormigón. Al sintetizar todos los resultados obtenidos, se concluye que la presencia de escoria contribuyó positivamente en todos los aspectos evaluados.

En una conclusión global sobre el objetivo principal de esta investigación, se concluye que es posible utilizar escoria de cobre en la fabricación de ladrillos de hormigón, ya que las propiedades obtenidas y demostradas mediante ensayos de laboratorio por esta investigación otorgaron mejores propiedades al hormigón que contenía escoria en su composición, esto emerge presentando una solución posible a la problemática planteada, la hipótesis de utilizar un residuo metalúrgico masivo en la fabricación de hormigón se ha demostrado posible basado en lo anteriormente presentado en este trabajo, reduciendo de esta forma el crecimiento de los botaderos de escoria, y presentándolos de otra manera como el acopio de una materia prima que puede ser utilizada para la fabricación de hormigones.

Las recomendaciones que se pueden realizar a modo de retro alimentación para esta investigación son:

A. Evaluar la incidencia de diferentes granulometrías en el árido fino en la elaboración del hormigón y estudiar cómo afecta la variación a los diferentes requerimientos del hormigón.
B. Almacenar los elementos que componen el hormigón bajo condiciones controladas para impedir su degradación.
C. Evitar el uso del amasado manual en el hormigón y preferir el amasado por medio de una Betonera para así lograr una mejor homogenización en la mezcla.
D. Por recomendación del laboratorio de construcción de la USM JMC siempre es mejor preferir el vibrado que el apisonado del hormigón ya que este genera mejoría en la segregación del material dentro de las probetas

BIBLIOGRAFIA.

- [1] ORIZOLA Gómez, Sebastián Andrés. Uso de escoria de cobre en cementos. Memoria (Ingeniero civil) Santiago, Chile: Universidad de Chile. Facultad de ciencias físicas y matemáticas, 2006. 11-12 p.
- [2] ARISMENDI Miranda, Jorge Alberto. Influencia de fibras sintéticas de poliolefina en la resistencia a la compresión y flexotracción en hormigón grados H20, H25, H30. Memoria (Ingeniero Constructor) Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile. Facultad de ciencias de la ingeniería, 2008. 39-40 p.
- [3] Instituto Nacional de Normalización (Chile). Áridos para morteros y hormigones – Requisitos generales. NCh. 163. Of.1979. Santiago, Chile: 1999. 4-20 p.
- [4] Instituto Nacional de Normalización (Chile). Áridos para morteros y hormigones – Tamizado y determinación de la granulometría. NCh. 165. Of.1977. Santiago, Chile: 1999. 3-9 p.
- [5] Instituto Nacional de Normalización (Chile). Hormigón – Requisitos generales. NCh. 170. Of.1985. Santiago, Chile: 1999. 3-33 p.
- [6] Instituto Nacional de Normalización (Chile). Bloques de hormigón para uso estructural - Ensayos. NCh. 182. Of.2007. Santiago, Chile: 2007. 3-6, 13-20 p.
- [7] Instituto Nacional de Normalización (Chile). Hormigón – Confección y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y tracción. NCh. 1017. Of.1975. Santiago, Chile: 1975. 2-8 p.
- [8] Instituto Nacional de Normalización (Chile). Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cubicas y cilíndricas. NCh. 1037. Of.1977. Santiago, Chile: 1999. 2-6 p.
- [9] Instituto Nacional de Normalización (Chile). Áridos para morteros y Hormigones – Determinación de las densidades real y neta y la absorción de agua de las gravas. NCh. 1117. Of.1977. Santiago, Chile: 1999. 2-6 p.

ANEXOS

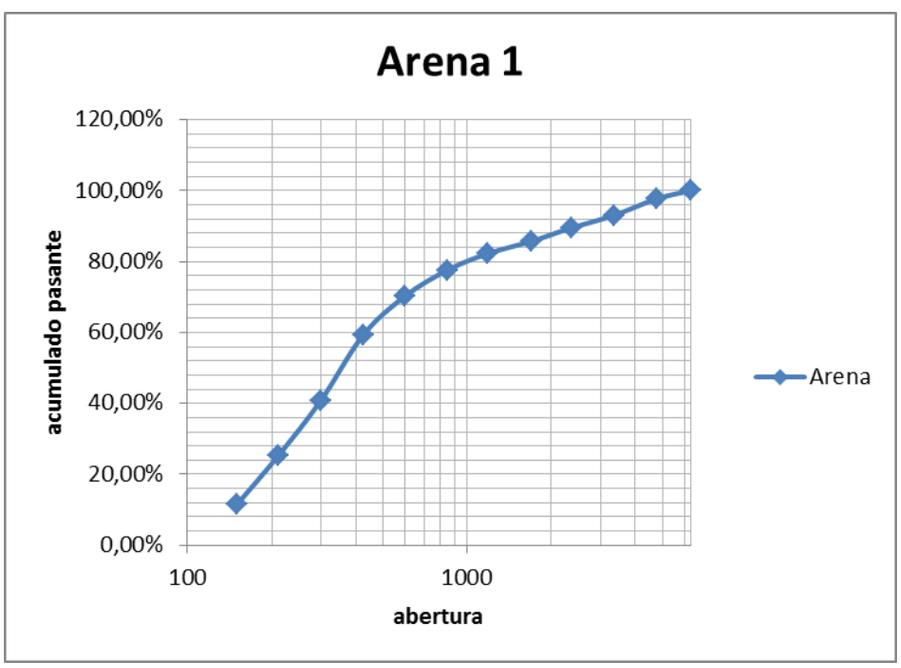
ANEXO A GRANULOMETRÍA DE ÁRIDOS UTILIZADOS

Como se explica en el Capítulo 2, se realizaron 3 análisis granulométricos para los áridos utilizados en esta investigación (arena, escoria y grava). Los cuales se muestran sus respectivas tablas y gráficos a continuación.

Arena:

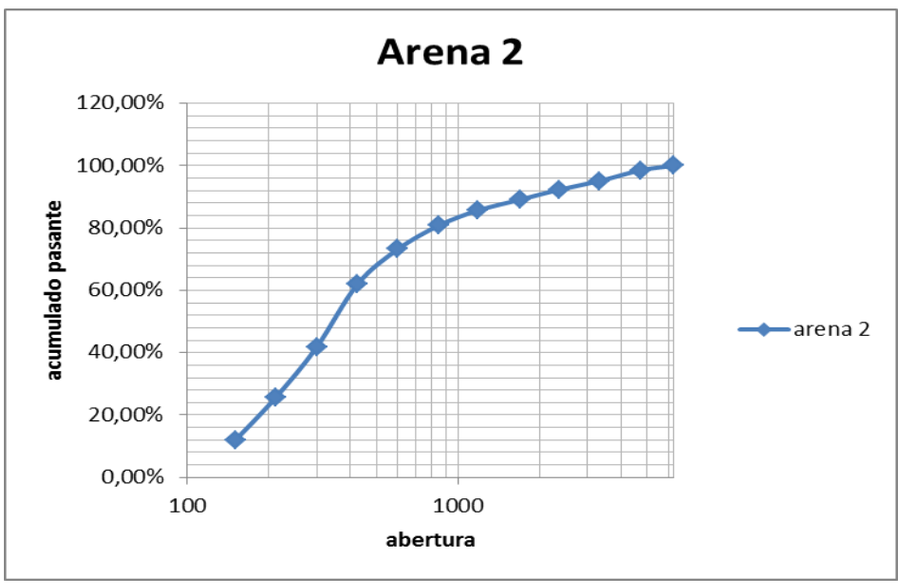
1.

Arena		Muestra 800g	Arena: 100%	Amplitud tiempo	70% 10min
Malla n°	Abertura µm	Masa en Tamiz	masa Acumulada	% Acumulado	% Acumulado Pasante
1/4	6300	0	0	0,00%	100,00%
4	4750	18,5	18,5	2,31%	97,69%
6	3350	37,1	55,6	6,95%	93,05%
8	2360	28,2	83,8	10,47%	89,53%
12	1700	30,2	114	14,25%	85,75%
16	1180	28,3	142,3	17,79%	82,21%
20	850	36,8	179,1	22,38%	77,62%
30	600	58,6	237,7	29,71%	70,29%
40	425	87,8	325,5	40,68%	59,32%
50	300	147,6	473,1	59,13%	40,87%
70	212	123,25	596,35	74,53%	25,47%
100	150	111,7	708,05	88,50%	11,50%
Fondo	<150	92,05	800,1	100,00%	0,00%



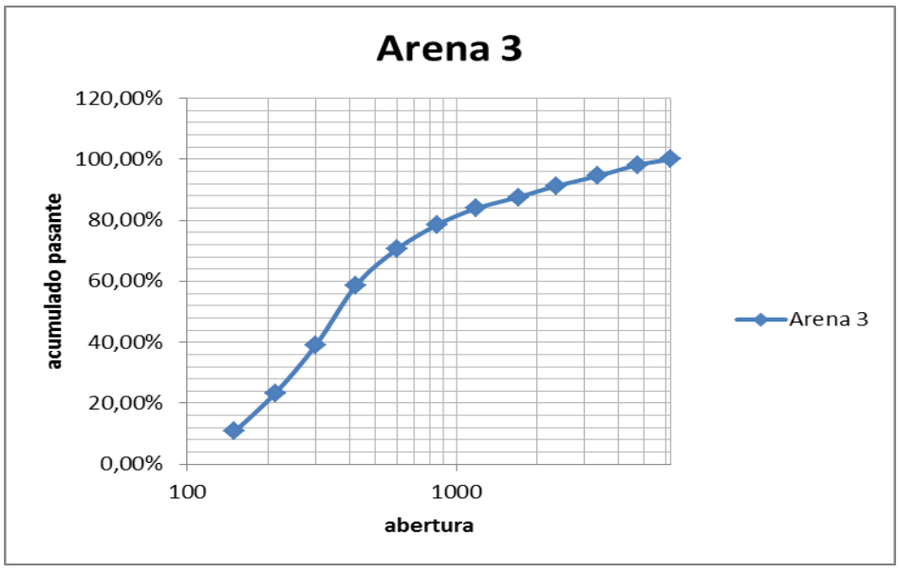
2.

arena 2		Muestra 600g	Arena: 100%	Amplitud	70%
				tiempo	10min
Malla n°	Abertura µm	Masa en Tamiz	masa Acumulada	% Acumulado	% Acumulado Pasante
1/4	6300	0	0	0,00%	100,00%
4	4750	8,5	8,5	1,42%	98,58%
6	3350	20,5	29	4,85%	95,15%
8	2360	17,2	46,2	7,72%	92,28%
12	1700	18,7	64,9	10,85%	89,15%
16	1180	21,1	86	14,38%	85,62%
20	850	28,6	114,6	19,16%	80,84%
30	600	45,3	159,9	26,73%	73,27%
40	425	67,3	227,2	37,99%	62,01%
50	300	121	348,2	58,22%	41,78%
70	212	96,3	444,5	74,32%	25,68%
100	150	82,3	526,8	88,08%	11,92%
Fondo	<150	71,3	598,1	100,00%	0,00%



3-

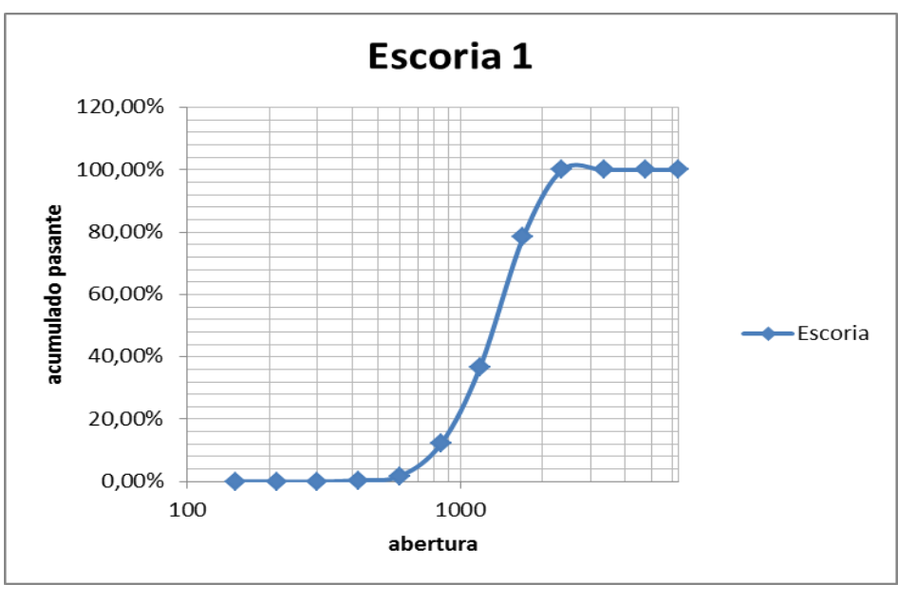
Arena 3		Muestra 600g	Arena: 100%	Amplitud	70%
				tiempo	10min
Malla n°	Abertura µm	Masa en Tamiz	masa Acumulada	% Acumulado	% Acumulado Pasante
1/4	6300	0	0	0,00%	100,00%
4	4750	10,8	10,8	1,81%	98,19%
6	3350	21,9	32,7	5,47%	94,53%
8	2360	19,3	52	8,70%	91,30%
12	1700	22	74	12,38%	87,62%
16	1180	22,5	96,5	16,15%	83,85%
20	850	31,7	128,2	21,46%	78,54%
30	600	48,2	176,4	29,52%	70,48%
40	425	70	246,4	41,24%	58,76%
50	300	117,8	364,2	60,95%	39,05%
70	212	94,1	458,3	76,70%	23,30%
100	150	74,9	533,2	89,24%	10,76%
Fondo	<150	64,3	597,5	100,00%	0,00%



Escoria:

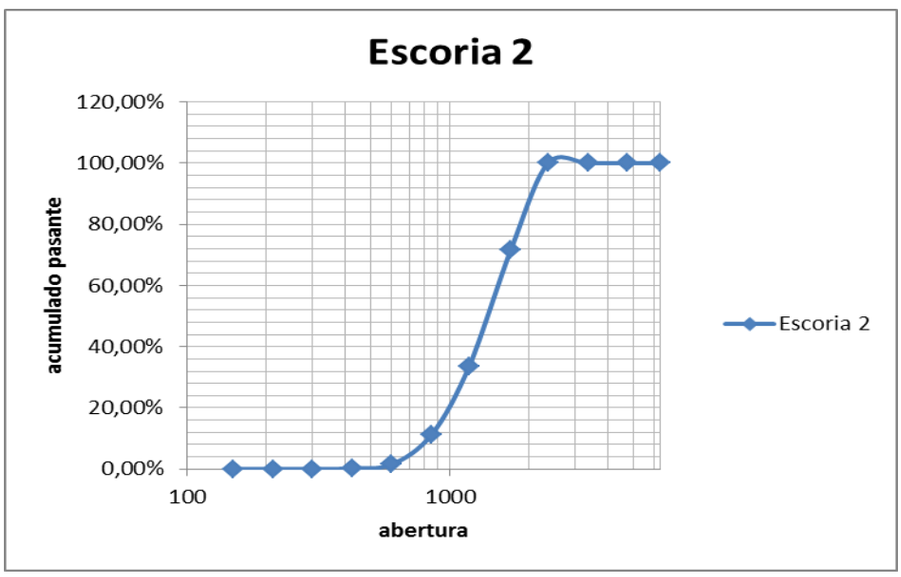
1.

Escoria		Muestra 800g	Escoria: 100%	Amplitud	70%
				tiempo	10min
Malla n°	Abertura µm	Masa en Tamiz	masa Acumulada	% Acumulado	% Acumulado Pasante
1/4	6300	0	0	0,00%	100,00%
4	4750	0	0	0,00%	100,00%
6	3350	0	0	0,00%	100,00%
8	2360	0	0	0,00%	100,00%
12	1700	171,8	171,8	21,51%	78,49%
16	1180	333,7	505,5	63,28%	36,72%
20	850	195,8	701,3	87,79%	12,21%
30	600	83,7	785	98,27%	1,73%
40	425	10,5	795,5	99,59%	0,41%
50	300	3,3	798,8	100,00%	0,00%
70	212	0	798,8	100,00%	0,00%
100	150	0	798,8	100,00%	0,00%
Fondo	<150	0	798,8	100,00%	0,00%



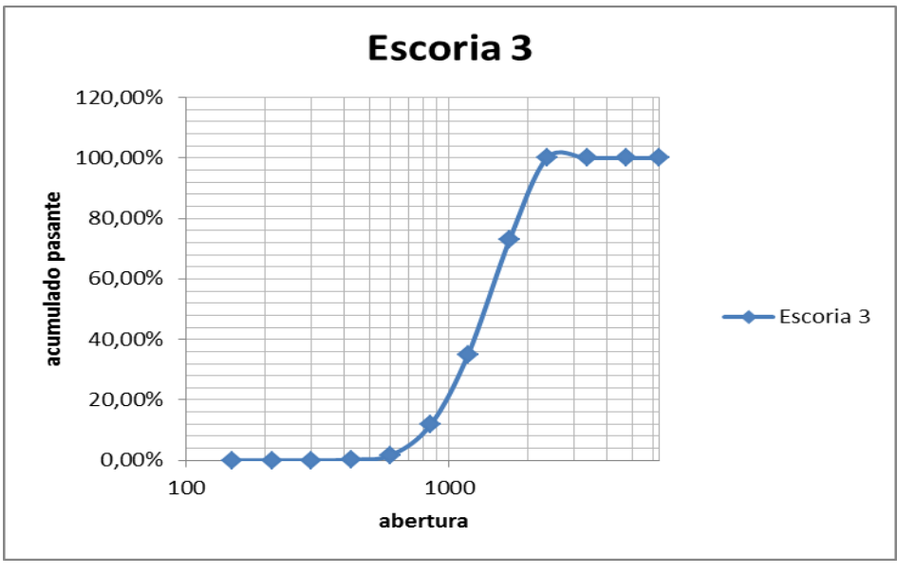
2.

Escoria 2		Muestra: 600g	Escoria: 100%	Amplitud	70%
				tiempo	10min
Malla n°	Abertura µm	Masa en Tamiz	masa Acumulada	% Acumulado	% Acumulado Pasante
1/4	6300	0	0	0,00%	100,00%
4	4750	0	0	0,00%	100,00%
6	3350	0	0	0,00%	100,00%
8	2360	0	0	0,00%	100,00%
12	1700	170,3	170,3	28,46%	71,54%
16	1180	227,4	397,7	66,46%	33,54%
20	850	132,9	530,6	88,67%	11,33%
30	600	58,5	589,1	98,45%	1,55%
40	425	8	597,1	99,78%	0,22%
50	300	1,3	598,4	100,00%	0,00%
70	212	0	598,4	100,00%	0,00%
100	150	0	598,4	100,00%	0,00%
Fondo	<150	0	598,4	100,00%	0,00%



3.

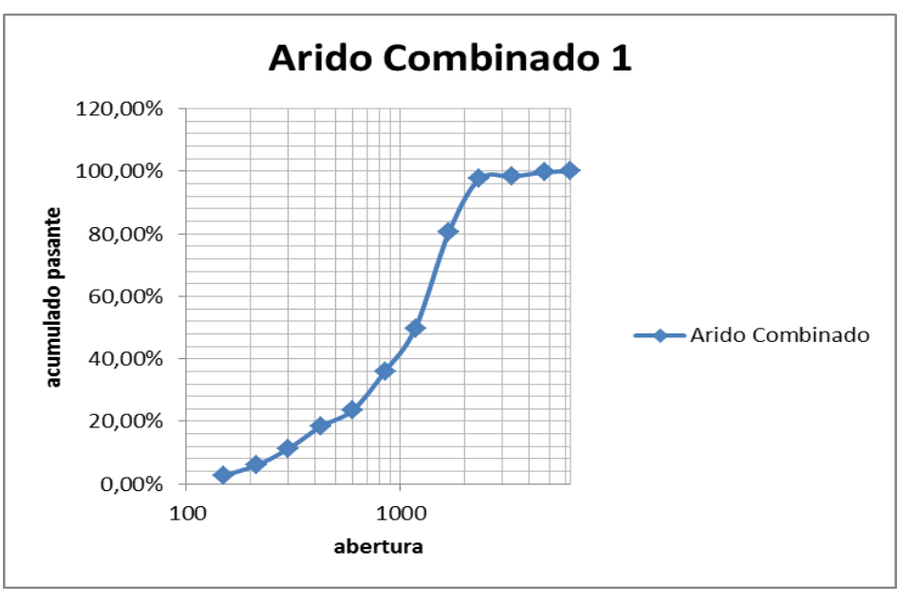
Escoria 3		Muestra: 600g	Escoria: 100%	Amplitud	70%
				tiempo	10min
Malla n°	Abertura µm	Masa en Tamiz	masa Acumulada	% Acumulado	% Acumulado Pasante
1/4	6300	0	0	0,00%	100,00%
4	4750	0	0	0,00%	100,00%
6	3350	0	0	0,00%	100,00%
8	2360	0	0	0,00%	100,00%
12	1700	161,7	161,7	26,97%	73,03%
16	1180	228,1	389,8	65,02%	34,98%
20	850	138,7	528,5	88,16%	11,84%
30	600	60,8	589,3	98,30%	1,70%
40	425	8,6	597,9	99,73%	0,27%
50	300	1,6	599,5	100,00%	0,00%
70	212	0	599,5	100,00%	0,00%
100	150	0	599,5	100,00%	0,00%
Fondo	<150	0	599,5	100,00%	0,00%



<u>Árido combinado:</u>

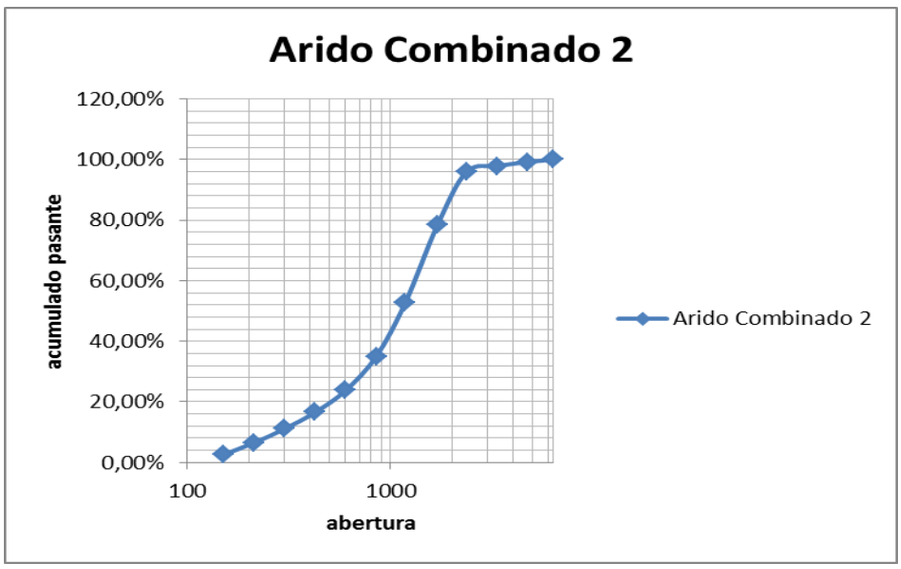
1.

Arido Combinado		Muestra 800g	Escoria: 616,8g Arena: 183,2g	Amplitud tiempo	70% 10min
Malla n°	Abertura µm	Masa en Tamiz	masa Acumulada	% Acumulado	% Acumulado Pasante
1/4	6300	0	0	0,00%	100,00%
4	4750	2,4	2,4	0,30%	99,70%
6	3350	11,1	13,5	1,69%	98,31%
8	2360	5,8	19,3	2,41%	97,59%
12	1700	134,9	154,2	19,29%	80,71%
16	1180	246,8	401	50,16%	49,84%
20	850	110,5	511,5	63,99%	36,01%
30	600	99,5	611	76,43%	23,57%
40	425	41,55	652,55	81,63%	18,37%
50	300	57	709,55	88,76%	11,24%
70	212	42,4	751,95	94,06%	5,94%
100	150	25,35	777,3	97,24%	2,76%
Fondo	<150	22,1	799,4	100,00%	0,00%



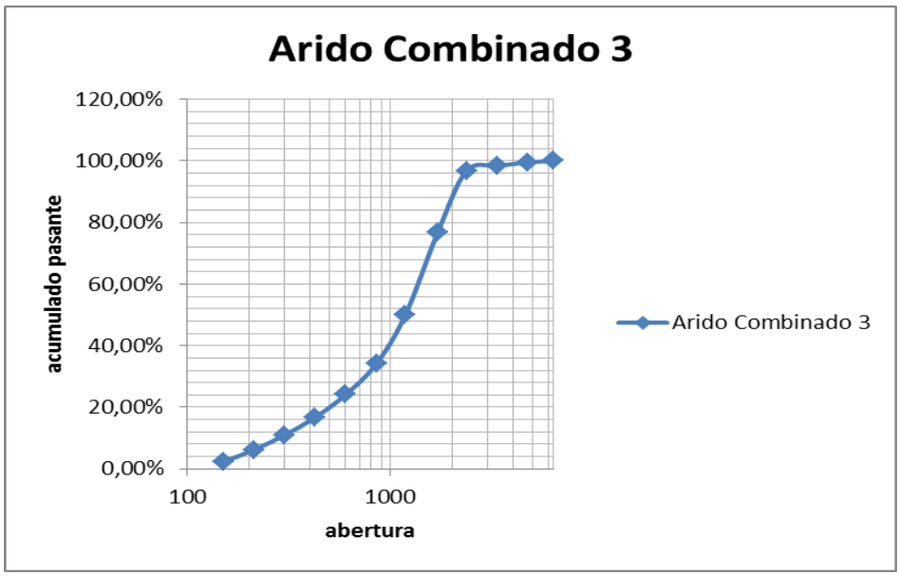
2.

Arido Combinado 2		Muestra 600g	Escoria: 462,6g Arena: 137,4g	Amplitud tiempo	70% 10min
Malla n°	Abertura µm	Masa en Tamiz	masa Acumulada	% Acumulado	% Acumulado Pasante
1/4	6300	0	0	0,00%	100,00%
4	4750	4,6	4,6	0,77%	99,23%
6	3350	7,9	12,5	2,09%	97,91%
8	2360	11,8	24,3	4,06%	95,94%
12	1700	104,8	129,1	21,55%	78,45%
16	1180	153,7	282,8	47,20%	52,80%
20	850	106,1	388,9	64,91%	35,09%
30	600	67,7	456,6	76,21%	23,79%
40	425	43,1	499,7	83,41%	16,59%
50	300	33,1	532,8	88,93%	11,07%
70	212	27,5	560,3	93,52%	6,48%
100	150	23,5	583,8	97,45%	2,55%
Fondo	<150	15,3	599,1	100,00%	0,00%



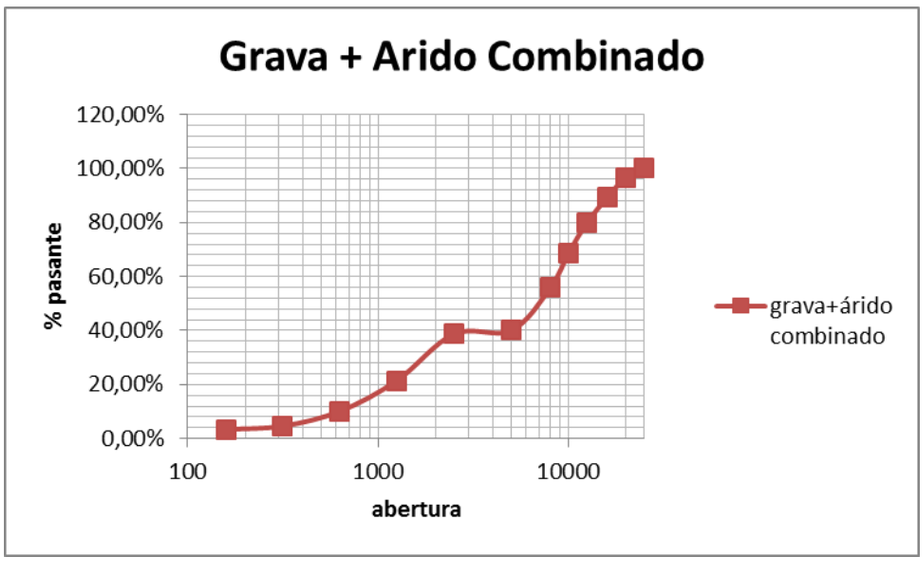
3.

Arido Combinado 3		Muestra 600g	Escoria: 462,6g Arena: 137,4g	Amplitud tiempo	70% 10min
Malla n°	Abertura µm	Masa en Tamiz	masa Acumulada	% Acumulado	% Acumulado Pasante
1/4	6300	0	0	0,00%	100,00%
4	4750	2,8	2,8	0,47%	99,53%
6	3350	7	9,8	1,64%	98,36%
8	2360	9,1	18,9	3,15%	96,85%
12	1700	120,6	139,5	23,28%	76,72%
16	1180	159,7	299,2	49,93%	50,07%
20	850	95,1	394,3	65,80%	34,20%
30	600	60,3	454,6	75,87%	24,13%
40	425	44,1	498,7	83,23%	16,77%
50	300	35	533,7	89,07%	10,93%
70	212	28,2	561,9	93,78%	6,22%
100	150	23,7	585,6	97,73%	2,27%
Fondo	<150	13,6	599,2	100,00%	0,00%



Grava más árido combinado:

grava + arido combinado		Muestra: 750g	Grava: 450g AC: 300g	Amplitud: 70% Tiempo: 10 min.
abertura	masa en tamiz (g)	masa acumulada	% acumulado	%acumulado pasante
25000	0	0	0	100,00%
20000	24	24	3,20%	96,80%
16000	55	79	10,54%	89,46%
12500	70	149	19,88%	80,12%
10000	85	234	31,22%	68,78%
8000	97	331	44,16%	55,84%
6300	110	441	58,83%	41,17%
4750	10,4	451,4	60,22%	39,78%
3350	3,5	454,9	60,69%	39,31%
2360	4,55	459,45	61,29%	38,71%
1700	60,3	519,75	69,34%	30,66%
1180	79,85	599,6	79,99%	20,01%
850	47,55	647,15	86,33%	13,67%
600	30,15	677,3	90,35%	9,65%
425	22,05	699,35	93,30%	6,70%
300	17,5	716,85	95,63%	4,37%
212	14,1	730,95	97,51%	2,49%
150	11,85	742,8	99,09%	0,91%
Fondo	6,8	749,6	100,00%	0,00%


Grava + Arido Combinado
120,00%
100,00%
80,00%
60,00%
40,00%
20,00%
0,00%
% pasante
100
1000
10000
abertura
grava+árido combinado

ANEXO B. ELABORACION DE HORMIGON

Materiales:

1. Cemento: El cemento que se utilizo es Polpaico Especial, este es recomendado para la fabricación de elementos prefabricados como bloques y ladrillos, en el rotulo de su envase especifica una duración máxima de dos meses en los cuales se debe almacenar en un lugar seco, alejado del sol y libre de humedad.
2. Arena: La arena utilizada en la elaboración del hormigón corresponde a arena fina según su clasificación granulométrica determinada por este estudio, esta arena proviene de Aridos Maggi Ltda. Y es obtenida en la rivera del rio Aconcagua.
3. Grava o Gravilla: El árido grueso con un diámetro nominal de 20mm proviene de la misma empresa que obtiene la arena, al mismo tiempo este también se obtiene de la rivera del rio Aconcagua, ambos áridos son almacenados a la intemperie solo con el cuidado de mantenerlos libres de impurezas orgánicas y llevando el control de su humedad dependiendo de la estación del año.
4. Escoria: Este material fue obtenido mediante la donación de un particular, es escoria utilizada frecuentemente en granalla para la limpieza de metales, el material ha pasado por un proceso de chancado y harneado del cual se desconocen las especificaciones antes de llegar a la investigación. Se sabe que el material es obtenido de la fundición ventanas y vendido a particulares para su procesamiento.
5. Agua: El agua utilizada corresponde a agua potable rural obtenida mediante pozos profundos en los alrededores del humedal de Mantagua.
6. Moldes: Elaborados con terciado marino de 9mm, dimensionado utilizando un serrucho eléctrico y acoplando los paneles mediante el uso de pernos de 1”.
7. Pala: la seleccionada fue una pala punta de huevo especial para trabajos de construcción y albañilería, todo el proceso se realizó utilizando los mismos materiales e insumos.
8. Varilla Pisón: Construida artesanalmente utilizando un fragmento de barra de acero estriado y convertidos sus extremos en semicircunferencias utilizando un esmeril angular.
9. Plana: utilizada para el alisado y razado de las caras de vaciado en las probetas de hormigón con el objetivo de entregar una superficie lisa
10. Carretilla Mezcladora: Carretilla de 90L con el objetivo de ser la superficie de mezcla para todos los materiales.

Procedimiento:

1. El primer paso en la elaboración de hormigón es la dosificación de los elementos constituyentes en el siguiente orden; Arena, Escoria, Cemento, Grava, Agua. Utilizando una balanza se mezclan los dos primeros elementos constituyentes, Arena/Escoria y Cemento.

2. Luego de tener la dosificación en masa, se depositan tanto arena, escoria y cemento dentro de la carretilla mezcladora como se muestra en la siguiente imagen y se procede a combinar los elementos generando movimientos de volcado dentro de la carretilla desde los 4 lados de esta hasta que la mezcla posea el mismo color.

3. Luego de tener mezclado tanto arena, escoria y cemento se adiciona la grava previamente dosificada en masa, esta cubre todo el material fino formando una capa de grava como se muestra en la siguiente imagen, a continuación se vuelve

a mezclar repitiendo el movimiento de volcado desde todos los lados de la carretilla.

4. Con la dosis de agua ya obtenida mediante tablas en el Capítulo 2 se procede a corregir la dosis de agua, restando el % de humedad encontrado en los áridos a la dosis de agua que se establece en las tablas. Luego se adiciona el agua de manera homogénea por la superficie y utilizando la pala se repite el movimiento de volcado en el interior, el mezclado es relativo ya que en este no se deben encontrar partes secas dentro de la mezcla, corresponde al mezclado más largo dentro de la fabricación de hormigón, el resultado final se muestra en la siguiente imagen.

5. El proceso continua con el vaciado dentro de los moldes, en el cual, mediante el uso de la plana y pala se vacía el material dócil dentro de los moldes como se muestra en la siguiente figura, el material se vacía en 3 capas, utilizando la varilla pisón luego de cada capa, se compacta el material teniendo cuidado de no tocar el fondo y con un numero de compactaciones determinado en el Capítulo 3

6. El procedimiento finaliza con el enrasado de las probetas utilizando en primera instancia la varilla para eliminar el material remanente, y finalmente utilizando la plana para otorgar una superficie lisa como muestra en la última figura.

7. Con las probetas alisadas comienza un primer proceso de curado en el cual las probetas permanecen 48 horas en el mismo lugar antes de ser desmoldadas.

Observaciones:

a) Durante la realización de esta investigación el cemento no pudo ser almacenado ni de la manera correcta ni por el tiempo máximo recomendado para la utilización por su fabricante, por razones de fuerza mayor y falta de espacio el cemento se almaceno durante aproximadamente 2 meses en una bodega donde las condiciones de humedad eran demasiado altas, esto se reflejó en la presencia de grumos dentro de los sacos, al comienzo de la construcción de las probetas estos fueron removidos mediante el uso de un harnero.
b) Consultas posteriores realizadas al apoyo docente del departamento de construcción de la Universidad Tecnica Federico Santa Maria, exponen que el mezclado utilizando una pala punta de huevo y carretilla es mucho menos eficiente en la homogenización de la mezcla de lo que debería ser. El profesional recomienda el uso de una mezcladora (Betonera) para obtener un hormigón de mayor calidad.

ANEXO C CERTIFICACION DE ESCORIA

Un compromiso con el medio ambiente
granalla
Producto Ecológico

CERTIFICADO DE CALIDAD

Cliente: Servicios Industriales Arega Ltda.

Com. Alejandro Alberto Barra Castillo E.I.R.L. certifica que los productos que se detallan a continuación cumplen con las especificaciones técnicas y contiene los siguientes parámetros:

Producto	: Granalla ecológica silicato de hierro a base de e-cobre
Granulado	: GR-SHP
Batch	: Cód. 27860
Cantidad certificada	: 10 toneladas dispuestas en 5 maxisacos de 2 ton. C/U

Controles de Calidad	Documento Asociado	Resultado Batch 27860
Granulometría		GR-SHP
Color, apariencia y olor	Factura Nº 5161 O/C N° 587P/2015	Partículas negras, cristalinas, sin olor.
Dureza		7,0 Mohs
Soluble al agua		No aplicable – inocuo en aguas.

Fecha de Fabricación	05/10/2015
Fecha de emisión	04/11/2015

Com. Alejandro A. Barra Castillo E.I.R.L

Alejandro Barra Castillo
Gerencia Comercial
gerencia@granalla.cl

Com. Alejandro A. Barra Castillo E.I.R.L

Camino Los Pinos Parcela 32 Galpón 17-A. San Bernardo – Santiago .228150568 Cel. 96426490

14 NOV 2015