UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

SEDE VIÑA DEL MAR - JOSÉ MIGUEL CARRERA

PROPUESTA DE RECICLAJE DE LA ESCORIA DE COBRE DE LA FUNDICIÓN VENTANAS DE CODELCO, PARA MITIGAR EL IMPACTO AMBIENTAL.

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

Alumno:
Pedro Carrasco Correa
Profesor Guía:
Ing. Sr. Marcelo Rojas Vidal

2017

RESUMEN

Las escorias de fundición constituyen uno de los principales desechos sólidos en las plantas de la industria del cobre, lo cual aumenta día a día. En Chile por cada tonelada de cobre producido se generan alrededor de 2,2 toneladas de escoria, y a nivel nacional se producen aproximadamente 4,5 millones de toneladas por año de escoria, existiendo a la fecha una acumulación de decenas de millones de toneladas. Esta escoria se acumula en canchas colindantes a cada planta industrial, constituyendo escóriales catalogados como pasivos ambientales, los cuales son potencialmente contaminantes si no son bien manejados. Esto genera la necesidad de poder encontrar usos alternativos a las escoria, de modo de reutilizar y dar un valor agregado a lo que se genera como subproducto de las fundiciones de cobre. Exploraremos los diferentes usos que se le puede dar a la chatarra con el fin de disminuir la cantidad de desechos y dar valor a las escorias.

INDICE DE MATERIAS **PAGINA**

Resumen ii

Índice de Materias iii

Siglas y Simbología v

Índice de Ilustraciones vi

Índice de Tablas vii

Introducción 1

Objetivos .2

Objetivos Generales 2

Objetivos Específicos 2

CAPÍTULO I

PROCESOS DE EXTRACCIÓN Y REFINACIÓN DEL COBRE

1.- Cobre 4

1.1.- El cobre en Chile 5

1.1.1.- Antigüedad 5

1.1.2.- Época Hispánica 6

1.1.3.- Siglo XIX 7

1.1.4.- Siglo XX 8

1.2.- Producción Mundial de Cobre 10

1.3.- Producción Chilena de cobre 13

1.4.- Naturaleza del mineral de cobre 15

1.5.- Procesos cupríferos 18

1.6.- Plantas concentradoras 19

CAPITULO II

FUNDICIÓN Y REFINERÍA DE VENTANAS

2.- Fundiciones de Cobre 21

2.1.- Tratamiento de los gases de cobre 22

2.2.- Escorias 24

2.3.- Complejo Industrial de Ventanas 24

2.4.- Fundición y Refinería de Ventanas 27

CAPITULO III

PRODUCCIÓN DE LA FUNDICIÓN Y REFINERÍA DE VENTANAS

3.- Producción y Residuos de la Fundición y Refinería de Ventanas 34

3.1.- Escoria de Cobre 36

3.2.- Orígenes de las escorias de Fundición 39

3.3.- Características de las escorias de Fundición 40

3.4.- Composición de las escorias de cobre 41

3.4.1.- Composición física 42

3.4.2.- Composición cristaloquímica 42

3.5.- Clasificación de las escorias de cobre 45

3.5.1.- Según grado de silicatos 45

3.5.2.- Según tiempo de enfriamiento 45

3.5.2.1- Escoria granallada 46

3.5.2.2.- Escoria de botadero 47

3.5.2.3.- Escoria expandida 48

3.6.- Escoria y Medio Ambiente 48

CAPITULO IV

USOS DE LAS ESCORIAS DE COBRE

4.- Usos de las escorias 51

4.1.- Balasto 52

4.2.- Arena abrasiva 52

4.2.1.- EbonyGrit 52

4.3.- Adocretos 53

4.4.- Materiales de Construcción 53

4.4.1.- Cemento Portland 53

4.4.2.- Escoria de cobre como reemplazo en áridos 57

4.4.2.1.- Escorias de cobre en áridos finos 57

4.4.2.2.- Escorias de cobre en reemplazo de áridos gruesos 58

4.5.- 0btención y recuperación de metales preciosos 58

4.6.- Elección del uso más adecuado para la utilización de las escorias de cobre de la Fundición y Refinería de Ventanas 60

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 61

BIBLIOGRAFÍA 63

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

SIGLAS

CODELCO	:	Corporación Nacional del Cobre
COCHILCO	:	Comisión Chilena del Cobre
CONAMA	:	Corporación Nacional del Medio Ambiente
CONICYT	:	Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica
ENAMI	:	Empresa Nacional de Minería
FMI	:	Fondo Monetario Internacional
RISES:	:	Residuos Industriales sólidos

SIMBOLOS

Cu	:	Cobre
Fe	:	Hierro
Km	:	Kilómetro
m	:	Metro
M	:	Molar
Mo	:	Molibdeno
Ni	:	Níquel
Tm	:	Toneladas métricas
t/d	:	Toneladas por día
t	:	Toneladas
Mm	:	Micrómetros
UMA	:	Unidad de Masa Atómica

INDICE ILUSTRACIONES:

Figura 1-1.	Productores de cobre chilenos	13
Figura 1-2.	Cobre refinado como proporción de Cobre de mina producido en Chile 1995-2014	14
Figura 1-3.	Procesos de producción de cobre dependiendo del tipo de mineral proveniente de la mina	16
Figura 1-4.	Tratamiento de minerales sulfurados	17
Figura 1-5.	Tratamiento de minerales oxidados	18
Figura 2-1.	Fundiciones de Cobre en Chile	22
Figura 2-2.	Zonificación satélite del borde costero Quintero – Puchuncaví	25
Figura 2-3.	Complejo Industrial Ventanas	26
Figura 2-4.	Esquema del proceso productivo de cobre en la Fundición y Refinería de Ventanas	28
Figura 2-5.	Ubicación de los principales centros de producción cuprífera de la zona centro y su relación con la Fundición y Refinería de Ventanas	30
Figura 3-1.	Fundición y Refinería de Ventanas	34
Figura 3-2.	Escorial de la Fundición y Refinería de Ventanas	35
Figura 3-3.	Difractograma de escorias de cobre	43
Figura 3-4.	Granalladora	44
Figura 3-5.	Escoria granallada	47
Figura 3-6.	Escoria de botadero de la Fundición y Refinería de Ventanas	47
Figura 4-1.	Generación de escorias y propuestas de tratamiento	51
Figura 4-2.	Resultados comparados de morteros fabricados con cemento Portland con y sin escoria de cobre	55
Figura 4-3.	Desarrollo de la resistencia en función del tiempo	56
Figura 4-4.	Cara de falla de probeta ensayadas a compresión	58

INDICE DE TABLAS

Tabla 1-1.	Ficha del Cobre	4
Tabla 1-2.	Producción por países (miles TM fino)	10
Tabla 1-3.	Producción versus Demanda de Cobre	11
Tabla 1-4.	Producción Mundial de Cobre de Mina	12
Tabla 2-1.	Unidades productivas y procesos en Fundición y Refinería	31
Tabla 3-1.	Composición de las escorias de cobre	41
Tabla 3-2.	Principales características físicas de las escorias de cobre	42
Tabla 3-3	Análisis de fluorescencia de Rayos X a muestras de la Fundición Ventanas	43
Tabla 3-4.	Óxidos elementales de escorias de cobre, análisis mediante fluorescencia	44
Tabla 4-1.	Composición Cemento Portland	54

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente trabajo es conocer los problemas que ocasiona una fundición de cobre en su entorno, estudiar las posibilidades de reutilización de la escoria producida, motivado por ver a través de los años como la zona de Quintero, Ventanas, Loncura y Horcones, se ha ido deteriorando por el crecimiento del parque industrial que se instaló, por las posibilidades que le otorgó el Plan Intercomunal de Valparaíso.

Trataremos de analizar el potencial tecnológico que puede entregar las escorias de cobre, desde el punto de vista de la ingeniería. Ya que pensamos que es una tremenda oportunidad para erradicar los problemas actuales que genera las grandes acumulaciones de chatarra en las zonas cercanas al desarrollo urbano e industrial, que pueden acrecentarse aún más, producto de la proyección de la actividad minera en los próximos años y sumado a las bajas leyes de los minerales. Lo anterior ha generado serios problemas ambientales e inconvenientes para la biodiversidad de las zonas cercanas a las plantas de procesamiento.

En las publicaciones revisadas en relación al tema, estos subproductos inutilizables entre muchos otros, se han ido depositando a cielo abierto, cubriendo extensas áreas con algún grado de acondicionamiento para tal efecto, en las cercanías de las fundiciones, y sólo se utilizan a muy pequeña escala, como rellenos en algunos caminos, como material abrasivo en algunas industrias o extracción de algún mineral.

Este trabajo, prevée un puntual análisis de los recientes avances de la re-ingeniería las escorias de cobre y derivados en aplicaciones en obras civiles. Examinando los trabajos de investigación reportados en la literatura sobre los posibles usos tecnológicos y las potencialidades, como también la caracterización y las propiedades de las escorias comúnmente generadas en Chile, de esta forma proyectar su aplicación en las obras civiles a través de un diagnóstico de los distintos orígenes de la escoria para la sustentabilidad de los procesos altamente contaminantes y reducción de ellos.

Las escorias de fundición constituyen uno de los principales desechos sólidos en las plantas de la industria del cobre, lo cual aumenta día a día. En Chile por cada tonelada de cobre producido se generan alrededor 2,2 ton de escoria, y a nivel nacional se producen aproximadamente 4,5 millones de toneladas por año de escoria, existiendo a la fecha una acumulación de decenas de millones de toneladas. Esta escoria se acumula en canchas colindantes a cada planta industrial, constituyéndose escoriales catalogados como pasivos ambientales, los cuales son potencialmente contaminantes si no son bien

manejados. Esto genera la necesidad de poder encontrar usos alternativos a las escoria, de modo de reutilizar y dar un valor agregado a lo que se genera como subproducto de las fundiciones de cobre.

OBJETIVOS

OBJETIVOS GENERALES

Elaborar una revisión bibliográfica que reconozca el desarrollo de la reutilización de las escorias del cobre, focalizados hacia buscar formas concretas de aplicación tecnológica, para ayudar a reducir masivamente estos residuos con alto impacto ambiental.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

I. Conocer los problemas ambientales del Complejo Industrial Ventanas
II. Reunir información relevante referente a las propiedades mecánicas, químicas y físicas de las escorias de cobre.
III. Conocer el comportamiento del material recuperado en las escorias del cobre, en procesos de fabricación de hormigón, en base a literatura recolectada.
IV. Estudiar la utilización de la escoria de cobre en los distintos escenarios tecnológicos, principalmente del punto de vista del medioambiente y las obras, escogiendo la más adecuada para la Fundación y Refinería de Ventanas.

La importancia del estudio viene dada por la necesidad de contar en el país con un mayor número de Fundiciones, pero éstas deben cumplir todas las normas ambientales, como por ejemplo en las emanaciones de gases, que en el caso de Ventanas, provocó un deterioro a toda la zona agrícola del entorno, al postergarse constantemente la construcción de la planta de ácido sulfúrico.

CAPITULO I

PROCESOS DE EXTRACCIÓN Y REFINACIÓN DEL COBRE

1. EL COBRE

El cobre es un elemento metálico, de color rojizo, entre sus propiedades se destaca por su alta conductividad eléctrica, resistencia a la corrosión, buen conductor térmico, dúctil y reciclable. Además de estas propiedades físicas, se han desarrollado estudios y demostrado que el cobre tiene propiedades biológicas antimicrobianas, dando excelentes resultados como bacteriostático / fungistático, actuando como limitador del crecimiento de bacterias y hongos patógenos, previniendo el crecimiento o provocando la muerte de microbios, dañando los microorganismos hasta su inactividad.

Tabla 1-1. Ficha del Cobre

Cobre (Cu = Cuprum)	Fusión: 1083,4 °C
Nº Atómico: 29	Peso Atómico: 63,546 UMA
Electrones: 2, 8, 18,1	Electronegatividad: 1,9
Temperatura de ebullición: 2.595 °C	Config. Electrónica: [Ar] 3d104s1

Fuente: Codelcoeduca. 2016[1].

El cobre se encuentra asociado a otros minerales en forma de óxidos o sulfuros, los que son extraídos desde depósitos geológicos o yacimientos. En Chile, y a nivel mundial, la obtención del cobre principalmente es a partir de concentrados de minerales sulfurados, aplicando técnicas piro-metalúrgicas, que se llevan a cabo en fundiciones.

Hace millones de años, gracias al impulso de procesos geológicos, el cobre subió desde las profundidades de la Tierra hasta la superficie, por lo que fue el primero de los metales en ser trabajado por los seres humanos, bajo la forma de cobre nativo o natural de alta pureza.

Este tipo de yacimientos hoy están prácticamente agotados en el planeta, por lo que habitualmente se encuentra disperso en grandes áreas y mezclado con rocas estériles y otros minerales.

La perspectiva del cobre se centra principalmente en la China. Su consumo se incrementará como consecuencia del crecimiento económico general. China ha sido un excelente ejemplo de crecimiento económico, con una tasa de crecimiento anual de 9.9% entre 1980 y 2010. La mayoría de pronósticos no vaticinan una desaceleración en China

[1] https://www.CODELCOeduca.cl/cobre/queeselcobre.asp (Consulta 6 Julio 2016).-

en un futuro cercano, el FMI pronostica que la economía de China se expandirá a una tasa anual de 9.7% durante los próximos 5 años.

India también es un caso muy convincente de la demanda del cobre y sólo se tiene que observar sus necesidades de electrificación. De acuerdo a la Agencia Internacional de Energía, la generación de energía en la India necesita aumentar en un 15-20% al año y, para cumplir con ello India necesitará invertir $1.25 trillones para el año 2030 en infraestructura de generación de energía. A partir de esta nueva infraestructura, la demanda anual de cobre en la India será más del doble.[2]

1.1. EL COBRE EN CHILE

1.1.1. Antigüedad

La producción de metal rojo en el continente americano se pierde en los siglos de la prehistoria. Los antiguos aborígenes de Chile, atacameños y diaguitas, llamaban al cobre "payen" y heredaron de sus antepasados, no solo el arte de trabajar trozos de metal nativo, sino también conocimientos de fundición, el arte del temple, la producción de bronces y otras técnicas bastante avanzadas para la época.

Los descubrimientos arqueológicos en el desierto de Atacama y en el Norte Chico, indican, con toda claridad, que el cobre había sido utilizado por los aborígenes 2000 años antes de la conquista (500 A.C.).

Los habitantes de Chuquicamata, pequeña tribu descendiente de los aimaras y quechuas, conocidos como chucos (de ahí el nombre del yacimiento), sacaban el mineral de este y otros depósitos ubicados en la Cordillera de los Andes. El cobre fue durante los dos primeros siglos de la Conquista una pequeña industria desarrollada en los valles de la zona norte, situación que recién cambió a mediados del siglo XIX. En efecto, en el año 1820 comienza la expansión de la producción, llegándose el año 1830 al cuarto lugar como productor a nivel mundial. Las actividades mineras de aquella época se extendieron desde Chañaral, Caldera y Copiapó en Atacama, hasta La Higuera, Brillador en La Serena, Andacollo y Tamaya en Coquimbo, y más al sur en Aconcagua, Quillota y Las Condes en la cordillera frente a Santiago.[3]

1.1.2. Época hispánica

[2] http://www.memoriachilena.cl/602/w3-article-752.html (Consulta 16 Julio 2016).-
[3] IDEM

La historia de Chile nos muestra que desde la llegada de los conquistadores, ha estado íntimamente relacionada con la minería. Almagro y Valdivia llegaron a nuestro territorio guiado por noticias, algo exageradas, de grandes cantidades de oro y plata en manos de los indígenas, pero se encuentran con pobreza de la región, en comparación con México y Perú, optaron por la explotación de lavaderos de oro con nativos esclavos, y con esa riqueza financiaron las primeras etapas de la colonización durante el siglo XVI.

El desastre de Curalaba a fines del siglo XVII detuvo la Conquista en el río Biobío, perdiéndose los terrenos auríferos del sur. Con la emergencia, los colonizadores replantean sus estrategias de subsistencia, reemplazan la explotación de metales preciosos, como primera fuente de ingresos, por la agricultura y la ganadería. En un mundo mayoritariamente agropecuario, la minería inicia una lenta recuperación en los cerros del norte, entre Atacama y el valle de Aconcagua. Este proceso en general fue protagonizado por españoles pobres y los mestizos, quienes estaban amparados en una legislación minera que autoriza la explotación de las minas por cualquier vasallo que procediera a su denuncio e inscripción, y que las mantuviese en operación, o "pobladas", de manera más o menos continua.

En la colonia la explotación minera se basó torno a los tres metales sales: el oro, la plata y el cobre. La producción de oro repuntó en el siglo XVIII, reemplazando a los lavaderos por las minas de Andacollo, Chuquicamata, Copiapó, Inca, Catemu y Petorca. La minería de la plata adquiere importancia durante el siglo XVIII, con la explotación de minas en Copiapó, las que sumadas a las de Uspallata y San Pedro Nolasco y las minas de azogue de Punitaqui y Quillota, permiten generar una pequeña producción de plata. La minería del cobre comienza a fines del siglo XVII, con minas en pequeña escala en Coquimbo para enviar cobre al Perú para la fabricación de cañones, luego se sumaran minas en la zona de Atacama y Aconcagua.

A fines del siglo XVIII, las ordenanzas mineras y el auge de la plata y el cobre en Atacama y Aconcagua, dan paso a la formación de un primer gremio minero, apoyado por el gobierno colonial a través del denominado Real Tribunal de Minería. Esta institución encargó al jurista Juan Egaña un informe sobre el real estado de minería en la Capitanía General de Chile, cuyo resultado, presentado en 1803, informó sobre la lamentable falta de tecnología de los mineros y la pobreza de su gremio. Esta

preocupación por la minería siguió durante el siglo XIX, iniciándose un nuevo ciclo en la minería nacional.[4]

1.1.3. Siglo XIX

Después de a la Independencia, la administración republicana tomó cuerpo lentamente, se consolida en la década de 1830 con el triunfo de los conservadores y el asentamiento del aparato burocrático del Estado. El nuevo orden, consagrado en la Constitución de 1833 e impulsado por el ministro Diego Portales, tiene como base económica la actividad minera de exportación, la que se convierte en la más dinámica de la economía nacional. Las exportaciones de plata y cobre aseguran un flujo de ingresos al Estado y sirven como medio de pago para las importaciones; y a su vez generaron una importante acumulación de capital en la burguesía minera, mercantil y financiera; la actividad minera introduce relaciones laborales capitalista en una sociedad fuertemente estamental.

En el siglo XVIII, se produjo el renacer del cobre y la plata debido al descubrimiento de plata de Agua Amarga y Arqueros. Esto significó una importante fuente de financiamiento a futuro de los gobiernos republicanos que les daría una tranquilidad económica por más de 30 años.

Posteriormente en 1832 Juan Godoy descubrió el Mineral de Plata de Chañarcillo en la ciudad de Copiapó, lo que atrajo a mucha gente que buscaba la fortuna fácil, y como se da en estos casos, hubo muchos que se hicieron de fortuna hasta el agotamiento del mineral. Por lo tanto Copiapó paso a ser un gran centro de capitales, tanto a si que se pudo financiar la línea férrea entre Copiapó y Caldera. Esta línea férrea fue financiada íntegramente con capitales regionales, lo que muestra el dinamismo alcanzado por la actividad minera en la provincia. La minería de la plata mantuvo sus niveles de producción con el descubrimiento del yacimiento de Tres Puntas en 1848, aunque desde mediados de la década siguiente comenzó a dar señales de agotamiento. En 1870, el descubrimiento y explotación por capitales chilenos del mineral de Caracoles, situado en territorio boliviano, dio un último impulso a la minería de la plata.

---

4 http://www.memoriachilena.cl/602/w3-article-752.html (Consulta 16 Julio 2016).-

Este auge se prolongó por cinco años más, por el rápido agotamiento de los minerales de alta ley, las primitivas técnicas de extracción y la lejanía de los puertos, para sacar la exportación. El abandono del sistema bimetálico sentó el fin de una actividad que, por medio siglo, había sido la más dinámica del país.

La minería del cobre tuvo un importante papel en la economía chilena del siglo XIX. La creciente demanda británica por el metal rojo, impulsó desde 1825 los envíos de cobre en bruto desde el país hacia el puerto de Swansea, donde se concentraban las fundiciones inglesas. En 1831, Charles Lambert, introduce el horno de reverbero que revolucionó las técnicas de fundición de cobre, al permitir el aprovechamiento de los sulfuros de cobre, que antes eran abandonados.

En la década de 1840, el uso del carbón de piedra como combustible de los hornos dio un impulso a la minería del carbón en Lota, Matías Cousiño creó una importante fundición de cobre en 1853, reinaugurada en 1867. En el período, se instalaron grandes fundiciones en la misma región productora de cobre, como la de Coquimbo, creada en 1840 por Joaquín Edwards y Charles Lambert y las de Tongoy y Guayacán, creadas por el empresario José Tomás Urmeneta para fundir el mineral extraído del yacimiento de Tamaya. [5]

José Tomás Urmeneta descubre el mineral de Tamaya en 1852, que aumenta la producción de cobre, llegando en la década de 1870 a su máximo nivel; ubicando a Chile como primer exportador de cobre del mundo. La caída de los precios internacionales del mineral a partir de 1874, a lo que se suman las precarias técnicas de extracción y la dependencia del capital financiero, crean problemas a la minería del cobre, la que ve cerrar numerosos yacimientos y fundiciones [6]. A fines del siglo XIX, la recuperación de los precios internacionales da un nuevo impulso, lo que fue aprovechado por grandes compañías norteamericanas que se instalaron en el país, como fueron la Braden Copper Company y la Chile Exploration Company, dejando fuera a empresas nacionales.[6]

1.1.4. Siglo XX

5 REYES, Pedro: "Panorama de Fundiciones y Refinerías de Chile, buscando la competitividad" en Revista Ingenieros del Cobre < http:// www.ingenierosdelcobre.cl/panorama-de-fundiciones-y-refinerias-en-chile-buscando-la-competitividad>

6 http://www.memoriachilena.cl/602/w3-article-727.html (Consulta 16 Julio 2016).-

A inicios del siglo XX, la minería pasa por un período decadente, después de haber sido durante décadas el principal productor del mundo. Sin embargo, la demanda mundial de cobre experimentaba un gran incremento, por el paulatino agotamiento de las minas de alta ley, donde por cada tonelada extraída entre el 30 y el 60 por ciento era cobre, provocando preocupación mundial ante la falta de nuevos yacimientos cupríferos para responder a la demanda.

Se soluciona con la explotación en gran escala de las grandes reservas mundiales de cobre porfírico, metal de baja ley, por cada tonelada de material extraído sólo entre el uno y el dos por ciento es cobre, se desarrolla una verdadera revolución tecnológica, para la extracción del mineral, su concentración y refinado, siendo necesaria la inversión de enormes capitales para poner en marcha su explotación. En las tres primeras década del siglo XX, entran en explotación once yacimientos de cobre porfírico en el mundo -ocho en Estados Unidos y tres en Chile- llegando estos a producir el 40 por ciento de la producción mundial de cobre en 1929.

Nuestro país contaba con las mayores reservas mundiales de cobre porfírico, distribuidas a lo largo de la cordillera de los Andes, desde Arica a Temuco, geólogos e ingenieros norteamericanos recorren el territorio en la búsqueda de yacimientos para explotarlos en gran escala, surgiendo el interés por Chuquicamata y Potrerillos en el Norte y de El Teniente en la zona central de Chile.

Surge la Braden Copper Company para explotar el mineral El Teniente en 1904, la Chile Exploration Company para explotar Chuquicamata en 1912 y la Andes Copper Mining para explotar Potrerillos en 1916. Estas invierten millones de dólares para poner en marcha la explotación de los nuevos yacimientos, logrando a fines de la década del veinte una producción que representa el 93 por ciento de la producción nacional, el 16,7 por ciento de la producción mundial. Con ello Chile recuperaba el lugar que había ocupado a mediados del siglo XIX, como uno de los principales productores mundiales de cobre.

Las enormes utilidades, los bajos impuestos y la autonomía que gozaban los norteamericanos en estos yacimientos, provocan un malestar en los sectores nacionalistas y socialistas del país, surgiendo una rechazo que demanda un aumento de impuestos y la nacionalización y estatización de los yacimientos, demandas que llevarían a "gran minería del cobre" a su nacionalización en 1971.[7]

7 http://www.memoriachilena.cl/602/w3-article-3632.html (Consulta 16 Julio 2016).-

La producción de cobre está caracterizada por la existencia de una Gran Minería, una Mediana y una Pequeña Minería.

La Gran Minería la constituyen CODELCO – Chile con sus Divisiones Chuquicamata, Salvador, Andina y El Teniente, del sector estatal, y del sector privado Minera Escondida Ltda. Compañía Minera Zaldívar.

La Mediana Minería la constituyen empresas tales como la Compañía Minera Disputada de Las Condes, Sociedad Minera Pudahuel, Compañía Minera Mantos Blancos, Compañía Minera Michilla S.A., Compañía Minera Cerro Centinela y otras, además de Fundación Alto Norte y ENAMI, que con su fundición y refinería cumple una labor de fomento hacia los pequeños y medianos mineros

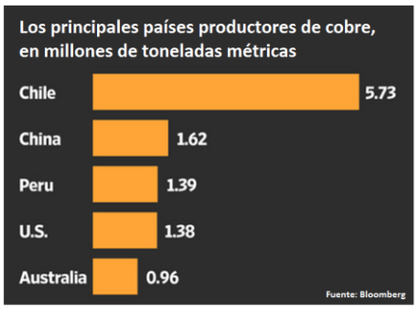
La Pequeña Minería está formada por una gran cantidad de pequeños propietarios que explotan sus minas sin contar con una elevada mecanización.

En la actualidad, nuestro país es el primer productor y exportador del mundo, posee las mayores reservas de mineral, el 26% del total mundial conocido.[8]

1.2. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE COBRE

Los principales productores de cobre de mina del mundo según COCHILCO son Chile (30%), China (9%); Perú (8%); Estados Unidos (7%) y el Congo (6%)[8]

Tabla 1-2.- Producción por países (miles TM metal fino)



Fuente: Lampadia, (2015) [9]

8 SUAREZ, Aedil. 2009. Mirada Macroeconómica al cobre. Universidad Técnica Metropolitana.(Disponible en: http://cobreutem.wordpress.com/category/1-introduccion/. Consulta 6 Julio 2016).-

Según la United States Geological Survey (USGS), las reservas conocidas de cobre en el 2011 a nivel mundial alcanzarían 690 millones de toneladas métricas de cobre fino y en Chile existirían del orden de 190 millones de toneladas económicamente explotables, equivalentes al 28 % del total de reservas mundiales del mineral; seguido de Perú con 90 millones, equivalentes al 13 % del total de reservas mundiales del mineral.

El consumo global de cobre refinado progresa en forma alarmante. La producción industrial no mantiene el ritmo de consumo de cobre, indicaciones recientes señalan que el consumo en la China son muy conservadoras, se especula que en el próximo cuarto de siglo, el planeta necesitará producir tanto cobre como el producido en toda la historia de la humanidad.[10]

Tabla 1-3.- Producción versus demanda

	2015 p	2016 f	2017 f
OFERTA			
Cobre Mina	19.320	19.988	20.620
Var. %	4,6	3,5	3,2
Refinado Primario	18.897	19.417	20.043
Var. %	3,3	2,7	3,2
Refinado Secundario	3.830	3.650	3.400
Var. %	-5,4	-4,7	-6,8
Oferta Total de Refinado	22.727	23.067	23.443
Var. %	1,8	1,5	1,6
DEMANDA			
China	11.353	11.637	11.928
Var. %	1,3	2,5	2,5
Resto del Mundo	11.299	11.254	11.369
Var. %	-1,7	-0,4	1,0
Demanda Total	22.652	22.891	23.297
Var. %	-0,7	1,1	1,8
BALANCE DE MERCADO	**75**	**175**	**146**

Fuente: Cochilco (2016)

9 http://www.lampadia.com/assets/uploads_images/images/Cobre%20gr%C3%A1fico%203.png (Consulta 23 Julio 2016).-

10 Fundamentos del cobre http://aqmcopper.com/sp/Fundamentos_del_Cobre.asp (Consulta 18 julio 2016).-

TABLA 1-4. PRODUCCIÓN MUNDIAL COBRE MINA Proyección COCHILCO 2015

País	2014	2015 P			2016 E			2017 E		
	KTMF	KTMF	DIFF.	Var. %	KTMF	DIFF.	Var. %	KTMF	DIFF.	Var. %
Chile	5.750	5.755	6	0,1%	5.771	16	0,3%	5.949	177	3,1%
China	1.632	1.665	33	2,0%	1.698	33	2,0%	1.715	17	1,0%
Perú	1.380	1.655	276	20,0%	2.235	579	35,0%	2.347	112	5,0%
Estados Unidos	1.383	1.342	-41	-3,0%	1.355	13	1,0%	1.362	7	0,5%
Australia	970	926	-44	-4,5%	944	19	2,0%	926	-19	-2,0%
R.D. del Congo	996	1.040	45	4,5%	926	-114	-11,0%	1.000	74	8,0%
Zambia	756	771	15	2,0%	821	50	6,5%	903	82	10,0%
Rusia	720	720	0	0,0%	731	11	1,5%	738	7	1,0%
Canadá	696	668	-28	-4,0%	678	10	1,5%	684	7	1,0%
Indonesia	366	586	220	60,0%	791	205	35,0%	735	-55	-7,0%
México	514	530	15	3,0%	583	53	10,0%	612	29	5,0%
Polonia	421	493	72	17,0%	493	0	0,0%	493	0	0,0%
kazajstán	501	441	-60	-12,0%	441	0	0,0%	441	0	0,0%
Brasil	298	358	60	20,0%	358	0	0,0%	361	4	1,0%
Mongolia	251	334	83	33,0%	334	0	0,0%	336	2	0,5%
Irán	199	219	20	10,0%	221	2	1,0%	221	0	0,0%
Otros	1.668	1.568	-100	-6,0%	1.575	8	0,5%	1.575	0	0,0%
Mundo	**18.499**	**19.070**	**570**	**3,1%**	**19.955**	**885**	**4,6%**	**20.398**	**443**	**2,2%**

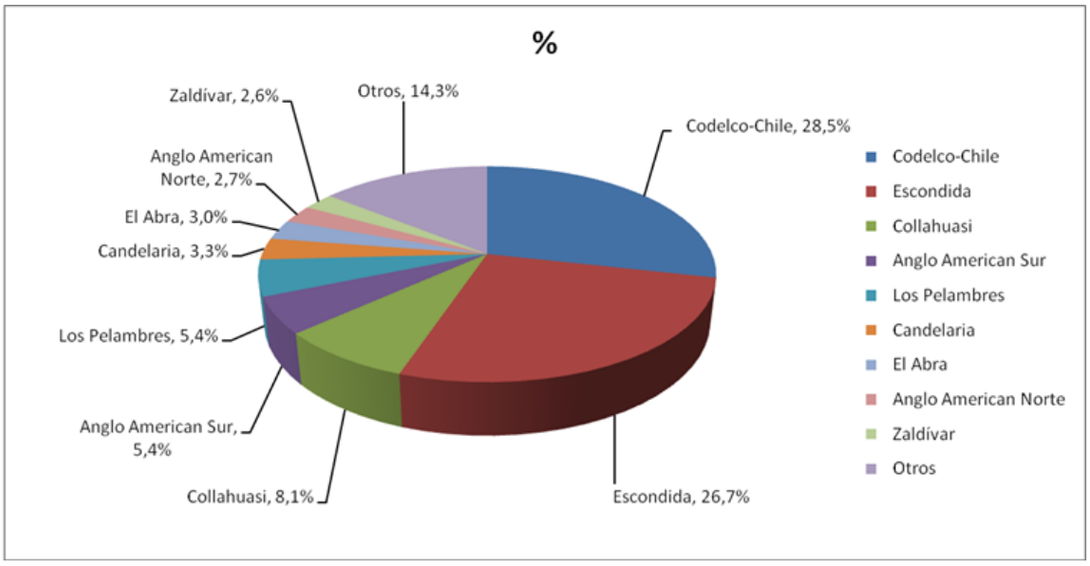
Fuente: Cochilco (2016) **11**

1.3. PRODUCCIÓN CHILENA DE COBRE

11 http://www.cochilco.cl/Archivos/destacados/20160114141116_Informe%20Trimestral%20Cochilco,%20Enero%202016.pdf, (Consulta 18 julio 2016).-

En la actualidad, Chile ocupa el primer lugar a nivel mundial como productor y exportador de cobre. Según COCHILCO, la producción de cobre fino en el 2015 fue de 5.764 millones de toneladas métricas de cobre fino, el 30% de la producción nacional lo constituyen 7 empresas estatales que constituyen CODELCO y la producción restante lo realizan empresas privadas en un 70% ver tabla. [12]

Figura 1-1. Productores de cobre chilenos



Fuente: Comercialización y producción de Cobre, 2016 [13]

La minería representa el 13% de todo lo que se produce en Chile al año, siendo la minería del cobre el 90%. Las exportaciones mineras son del orden del 60% de las exportaciones del país; por algo en los años 60's la minería del cobre era llamada "El sueldo de Chile". La producción minera representa 200 veces la producción acuícola nacional, 24 veces el sector forestal y 17 veces el sector vitivinícola. [13]

Dependiendo de las características mineralógicas el mineral extraído puede ser clasificado como sulfuro u óxido. Los sulfuros se procesan en plantas concentradoras para producir concentrado de cobre. El 99% de los minerales de sulfuro son procesados en plantas cercanas a las minas. Una pequeña fracción es extraída por pequeños empresarios y vendida a las plantas concentradoras. La composición mineralógica de los concentrados depende directamente de su origen, por lo general corresponde a un

12 REYES, Pedro: "Panorama de Fundiciones y Refinerías de Chile, buscando la competitividad" en Revista Ingenieros del Cobre < http:// www.ingenierosdelcobre.cl/panorama-de-fundiciones-y-refinerias-en-chile-buscando-la-competitividad>

13 http://comercializacionyproduccion.comunidadviable.cl/content/view/978048/.html#.WEbM7enrvmQ (Consulta 18 julio 2016).-

tercio de cobre, un tercio de azufre y un tercio de fierro. Estos concentrados pueden ser exportados como tal o tratados en fundiciones para producir cobre refinado. El proceso de fundición produce gases con contenido de anhídrido sulfuroso, material particulado y arsénico, para los cuales se han establecido algunas regulaciones ambiéntales. [14]

Figura 1-2. Cobre Refinado vs cobre de mina

Fuente: Ciper Chile, 2016

El grado de elaboración del mineral de cobre ha descendido a través de los años, ya que la producción y las exportaciones de cobre se hacen en forma de concentrados, que serán finalmente refinados en otros países. La situación es grave si la tendencia se proyecta en el tiempo: ya que sin ningún tipo de intervención del Estado en la materia, el porcentaje de cobre refinado que Chile produciría bajaría desde un actual 47,5%, a solo un 12% de aquí a 10 años.[15]

[14]http://ciperchile.cl/2016/04/12/cobre-por-que-se-necesita-una-politica-nacional-de-fundiciones/(Consulta 18 julio 2016).-

[15] SEPÚLVEDA Estay, Consuelo: "Utilización de escorias de fundición para la producción de compuestos de Hierro, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Químico, Universidad de Chile, 2006

1.4. NATURALEZA DEL MINERAL DE COBRE

Como se mencionó anteriormente, el mineral de cobre se puede encontrar en la naturaleza en dos estados, de forma sulfurada u oxidada, en la industria del cobre existen dos formas de procesar dicho mineral proveniente de la mina, para obtener los cátodos con una pureza de 99,99% requeridos en el mercado, el proceso utilizado depende directamente del tipo de mineral que se quiera procesar.

Los minerales sulfurados son extraídos de la mina, pasan a una etapa de conminución, posteriormente a una concentración de minerales, fundición de los mismos, también conocida como piro-metalurgia, por trabajar con hornos a altas temperaturas y finalmente a una etapa de electro-refinación para obtener los cátodos deseados

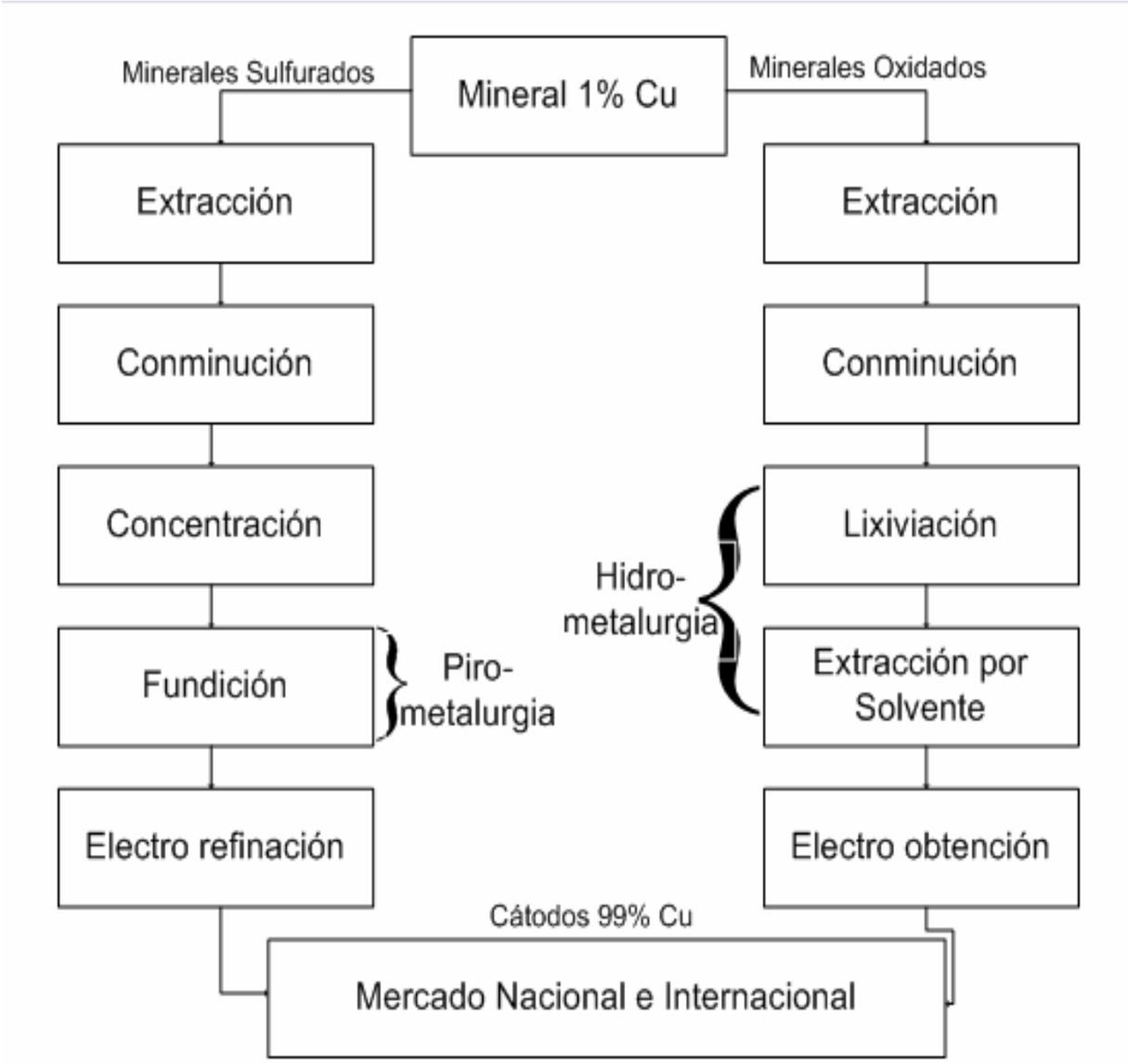
El 80% del cobre primario mundial se extrae de minerales sulfurados, y así seguirá siendo por mucho tiempo dadas las características de los minerales que se proyecta explotar y las reservas existentes.

Los minerales oxidados son extraídos de la mina, procesados en una etapa de conminución y posteriormente pasan a una etapa que lixiviación y extracción por solventes, para finalmente, a través de una etapa de electro-obtención, producir los cátodos comercializados en el mercado.

Cada una de las etapas recién descritas para los distintos minerales procesados se puede observar en la Figura 1.3. [16]

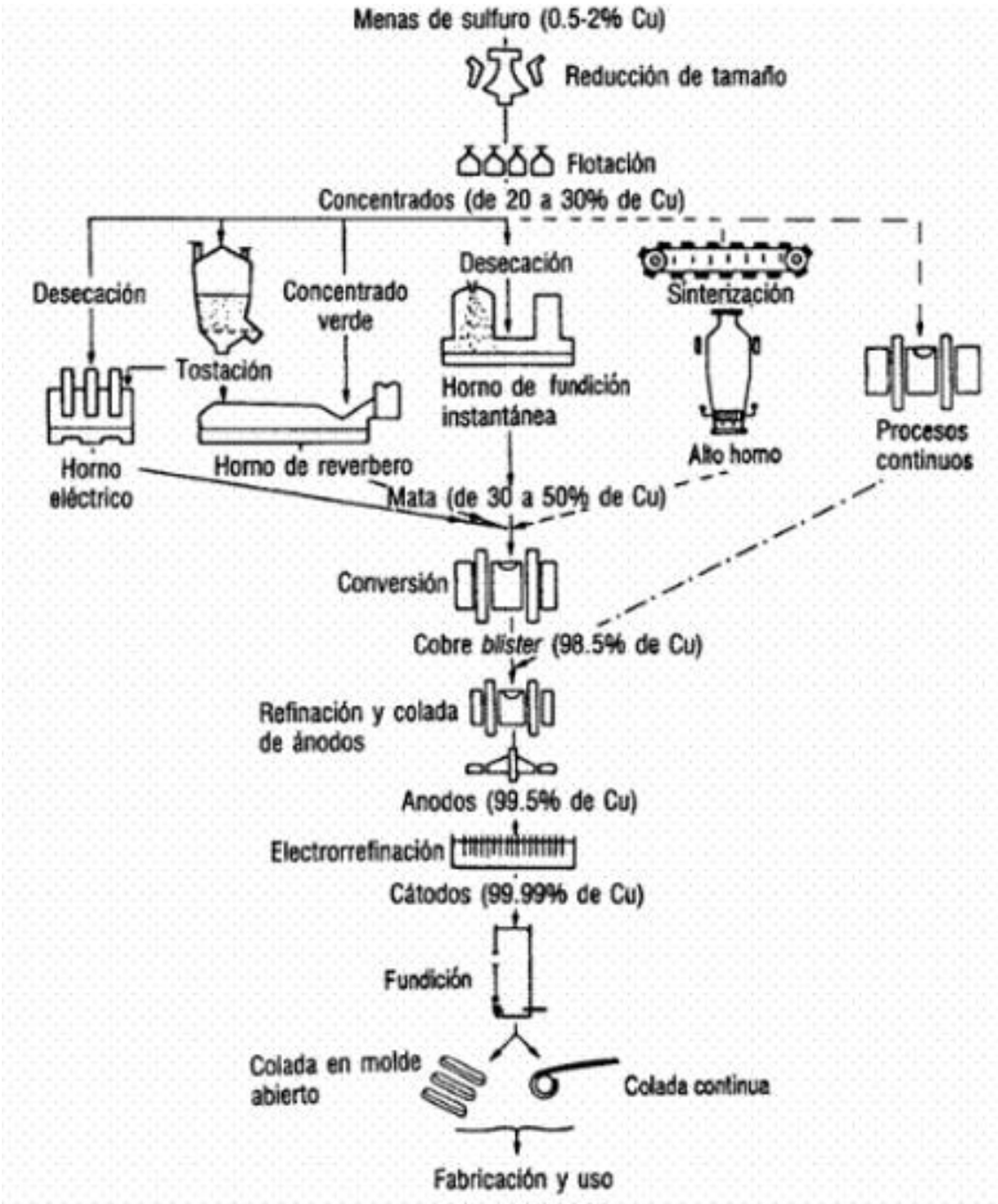
16

Figura 1-3. Procesos de producción de cobre
dependiendo del tipo de mineral proveniente de la mina.



Fuente: Memoria: Consuelo Sepúlveda. Ing. Civil Química, U de Chile (2006)

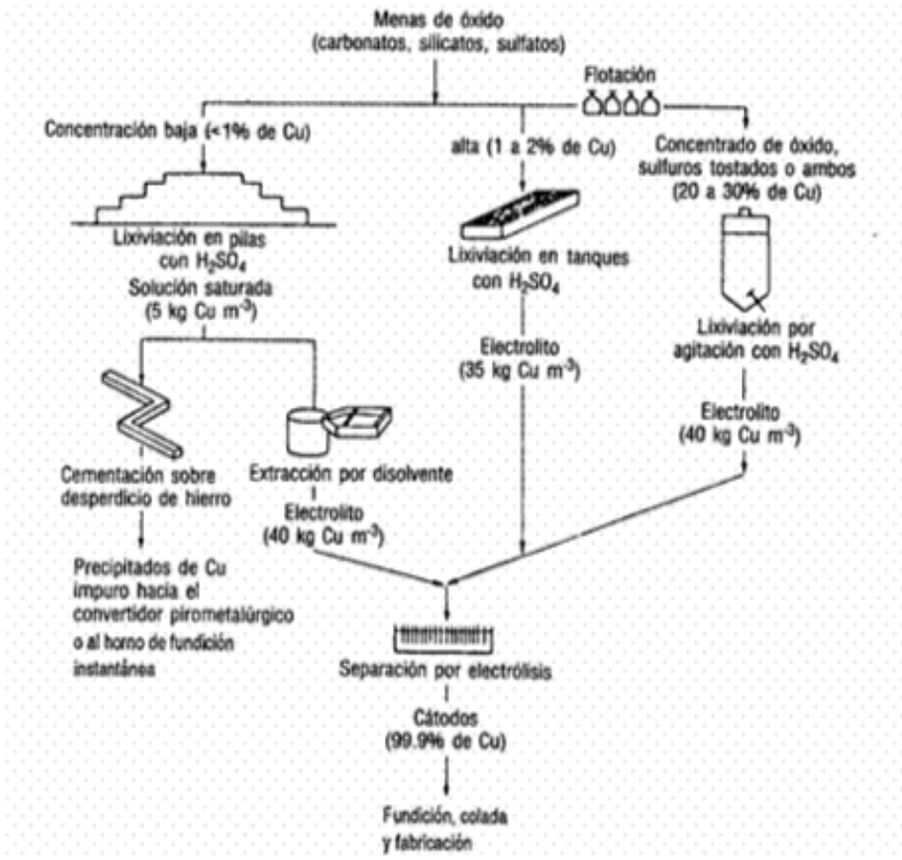
Figura 1-4. Tratamiento de minerales sulfurados



Fuente: USACH Pirometalurgia del cobre

Figura 1-5. Tratamiento de minerales oxidados

Fuente: USACH Piro metalurgia del cobre



1.5. PROCESOS CUPRIFEROS

Nosotros ya dijimos que el cobre se encuentra en la naturaleza en forma oxidada y en forma sulfurada. Los tratamientos difieren uno del otro, es decir los sulfurados, son procesados para transformarlos a concentrados cerca de las minas.

Los concentrados tienen alrededor un 28% a un 30% de cobre y en las mismas proporciones azufre y fierro. Comercialmente el concentrado puede venderse como tal o pasar directamente a una fundición para su posterior refinación (cátodo).

En Chile debido a un escaso número de fundiciones y que el 70% del cobre se halla en manos privadas los concentrados se envían prácticamente en bruto hacia el exterior.

1.6. PLANTAS CONCENTRADORAS

Los sulfuros en las fundiciones de cobre, previo a su tratamiento deben pasar por un proceso de concentración, ya que generalmente tienen una muy baja concentración de cobre. Este proceso es llevado a cabo cerca de las minas: el mineral es triturado, molido y sometido a un proceso de flotación. El concentrado producido en las plantas concentradoras puede ser exportado directamente o procesado en las fundiciones de cobre para producir cobre refinado.

Las principales decisiones en esta etapa son cuánto concentrado exportar y cuánto procesar en el país, y qué fundiciones deberían procesar el concentrado que va a ser tratado a nivel doméstico. El volumen de concentrado producido anualmente durante el horizonte de planificación es determinado exógenamente al modelo, y es estimado periódicamente por los expertos de COCHILCO.

En resumen podemos señalar brevemente cada uno de los procesos antes mencionados

I. Extracción,, se puede considerar la perforación de rocas como una combinación de las siguientes acciones: percusión, rotación, empuje y barrido
II. La conminución, considera los mecanismos de reducción de tamaño de las rocas mineralizadas obtenidas en yacimientos, triturándolas en chancadoras y molinos.
III. El proceso de concentración de material de minerales, permite separar los compuestos sulfurados de cobre mediante flotación para aumentar la concentración entre a 20 a 30% de Cu, a partir de los minerales que poseen solamente alrededor de 1 a 2% de Cu.
IV. Procesos Pirometalúrgicos, donde se descomponen termoquímicamente los concentrados para obtener el metal blanco y producir ánodos de cobre con alrededor del 98% de pureza.
V. Los procesos Electrometalúrgicos, se utilizan para producir cátodos o ánodos de cobre con un 99.998% de pureza a través de la electro-refinación.[17]

[17] CARDENLEY, René y MONDSCHEIN, Susana: "Control de la contaminación atmosférica de las fundiciones estatales de cobre mediante un sistema de apoyo de decisiones". Revista Ingeniería de Sistemas, Dpto de Ingeniería Industrial, Universidad de Chile, Santiago, Vol. XIV N° 1 Junio 2000, páginas 79-102

.

CAPITULO II

FUNDICIÓN Y REFINERÍA DE VENTANAS

2. FUNDICIONES DE COBRE

El concentrado es sometido a un proceso de fusión en un horno (convertidor El Teniente, horno Flash u otra tecnología) para producir "mata". Posteriormente esta mata es procesada en convertidores (por ejemplo convertidor Pierce-Smith) para producir cobre refinado o blister. En el país existen cinco fundiciones de cobre estatales con una capacidad total de aproximadamente 4 millones de toneladas de concentrado por año. Las principales decisiones en esta etapa del proceso productivo corresponden a la capacidad de fundición en cada período del horizonte de planificación y la tecnología a utilizar en dicho proceso. Las diferentes tecnologías de fundición difieren principalmente en la inversión y costos de operación y en el volumen y concentración de los gases que ellas emiten en cada etapa del proceso de fundición.

La elección de la tecnología más adecuada se hace pensando en su eficiencia en términos de la inversión y costos de operación requeridos y su productividad. Sin embargo, con las nuevas regulaciones ambientales, factores adicionales deben ser considerados. Estas tienen un impacto directo en el proceso de fundición; algunas fundiciones deben reducir su producción durante los períodos críticos de contaminación, así, será conveniente en algunas fundiciones reducir la capacidad instalada o reemplazarlas por nuevas tecnologías de fundición. Finalmente, dadas las proyecciones crecientes para la producción de concentrado de cobre para los próximos años, es importante evaluar un aumento en la capacidad de fundición del país.

Existen siete fundiciones en el país, dos privadas y cinco estatales. Las estatales son Chuquicamata, Caletones, Potrerillos, Ventanas, y Paipote, las que reciben concentrado para ser transformado en cobre refinado desde 24 plantas concentradoras, siete de las cuales son de propiedad estatal.

Ninguna de las fundiciones estatales satisface las regulaciones medioambientales, aunque cuentan con planes de limpieza de base, los que están siendo implementados y se han completado algunas de las etapas con éxito, presentan el problema que cada fundición desarrolló su propio plan de limpieza en forma individual, sin considerar los efectos de sus decisiones sobre las otras fundiciones.

El costo total esperado de estos planes es de aproximadamente US$1 billón, presupuesto que está asociado principalmente a la construcción de plantas de ácido sulfúrico y precipitadores electrostáticos. Las plantas de ácido sulfúrico transforman el

anhídrido sulfuroso en ácido sulfúrico, haciendo que éste sea uno de los subproductos más importante del proceso de fundición de cobre.[18]

Figura 2-1: Fundiciones de Cobre en Chile y años de puesta en marcha.

Fuente: Memoria UACH [19]

2.1. TRATAMIENTO DE LOS GASES CONTAMINANTES

Los gases producidos en las fundiciones son emitidos directamente a la atmósfera o tratados en plantas de abatimiento de contaminantes. La tecnología utilizada para reducir el material particulado corresponde a precipitadores electrostáticos. Estos reducen la contaminación en más de un 90%.

[18] CARDENLEY, René y MONDSCHEIN, Susana: "Control de la contaminación atmosférica de las fundiciones estatales de cobre mediante un sistema de apoyo de decisiones". Revista Ingeniería de Sistemas, Dpto. de Ingeniería Industrial, Universidad de Chile, Santiago, Vol. XIV N° 1 Junio 2000, páginas 79-102

[19] OYARZÚN Kneer, Iván Alejandro. "Influencia de las escorias de cobre en la fabricación de hormigón" Tesis para optar al título de Ingeniero Civil en Obras Civiles Universidad Austral de Chile, Valdivia, 2013

Las emisiones de anhídrido sulfuroso son tratadas en plantas de ácido sulfúrico, a pesar de que el ácido sulfúrico puede ser peligroso, éste tiene un gran uso en varios sectores productivos, incluyendo la propia minería y la agricultura.

En Chile por ejemplo, el proceso de lixiviación utilizado para tratar los óxidos de cobre es uno de sus principales consumidores de ácido sulfúrico. Las plantas de ácido son diseñadas para procesar un volumen máximo de gases que contengan una concentración de anhídrido sulfuroso dentro de un rango específico de diseño. Estas dos cantidades volumen y concentración de los gases que entran a la planta- determinan la producción de ácido sulfúrico.

Dependiendo de la tecnología de fundición usada, los gases contaminantes producidos en cada etapa del proceso de fundición (por ejemplo, horno Flash, convertidor Teniente y convertidor Pierce-Smith) difieren en los volúmenes y concentraciones de los gases contaminantes emitidos. La producción de ácido sulfúrico, se puede determinar a partir de la mezcla de gases que será procesado en la planta de ácido. Esta decisión determina a su vez la cantidad de anhídrido sulfuroso que será emitido a la atmósfera.

Los costos de producción del ácido sulfúrico dependen de la concentración de anhídrido sulfuroso de los gases procesados en la planta. Debido a que dado un volumen de gases, los que tienen una mayor concentración producen mayor cantidad de ácido sulfúrico. Esta característica hace que las nuevas tecnologías de fundición, emitan menores volúmenes de gases de altas concentraciones que puedan ser atractivas, a pesar de que las inversiones y costos de operación sean más elevados.

En la década de 1970 y 1980, Chile fundía casi el 100%, en los años 90 pasó aproximadamente al 82% del concentrado, y hoy en día ya sea como ánodo o como cátodo, el 35% de los casi 34 millones de toneladas de cobre sulfurado que se está vendiendo al mundo en forma de ánodo + cátodo. Entonces, *"podemos decir que la industria de fundiciones no siguió el patrón de la producción de concentrados, al menos en nuestro país. El 2003 teníamos una capacidad de 18% de la fundición total en el mundo, hoy en día estamos en un 14%. En fusión pasamos del 15% al 10% en la actualidad".*[20]

[20] ROJAS Barrera, Gabriel: "Historia Ambiental de la generación termoeléctrica en Ventanas: La producción ecológica de la compensación económica". Tesis de grado: Magister en Geografía, mención Recursos Territoriales, Universidad de Chile. Año 2015.

2.2. ESCORIAS

Entre los productos de los procesos pirometalúrgicos en la producción del Cobre, se encuentran las escorias de cobre, a pesar de ser un desecho industrial, cumple un rol importante durante el proceso producción del metal rojo, ya que sus componentes, disminuyen el punto de fusión (1200°C), lo cual es conveniente para la operación del proceso).

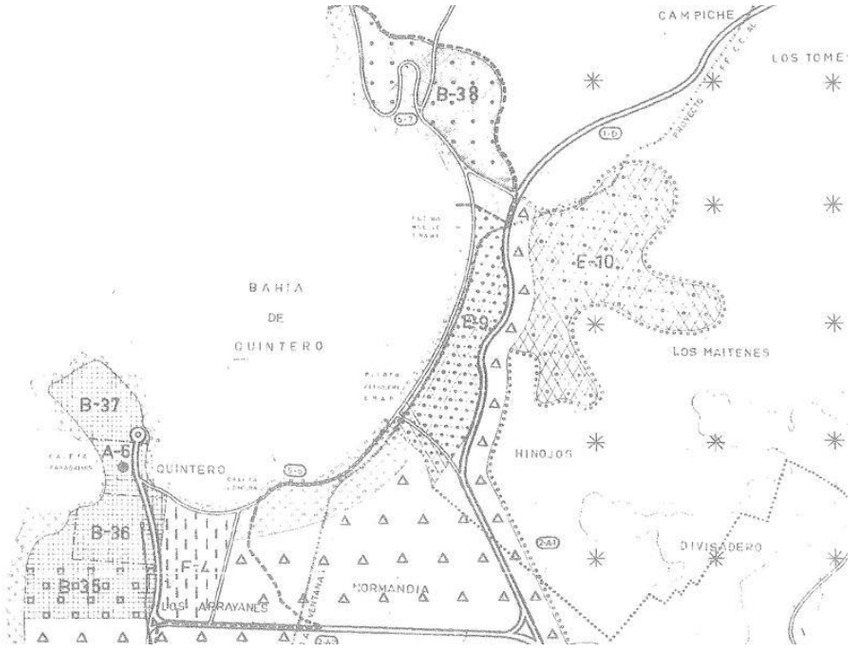
En los procesos industriales de obtención de metales, la escoria se define como una fase vítrea que se forma a partir de la ganga proveniente de los minerales.

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

2.3.COMPLEJO INDUSTRIAL VENTANAS (CIV)

El Centro Industrial de Ventanas es uno de los polos de desarrollo industrial más grandes de Chile, en él se ubican no solo una fundición y refinería de cobre, también se produce energía por medio de termoeléctricas, es además una de las entradas de gas natural al país, además se ubican diversas empresas de carácter contaminantes. Su historia se remonta a los años sesenta, cuando se instala la fundición de cobre perteneciente a la Empresa Nacional de Minería (ENAMI), tras una lucha entre distintas regiones por atraer su instalación, ya que se creía esta traería beneficios y progreso no solo al país, sino que también a la zona. Luego de la instalación del CIV, Puchuncaví sufrió drásticos cambios no solo geográficos sino que también sociales, culturales, ambientales, entre otros.

Figura 2.2. Zonificación Satélite Borde Costero Quintero Puchuncaví.



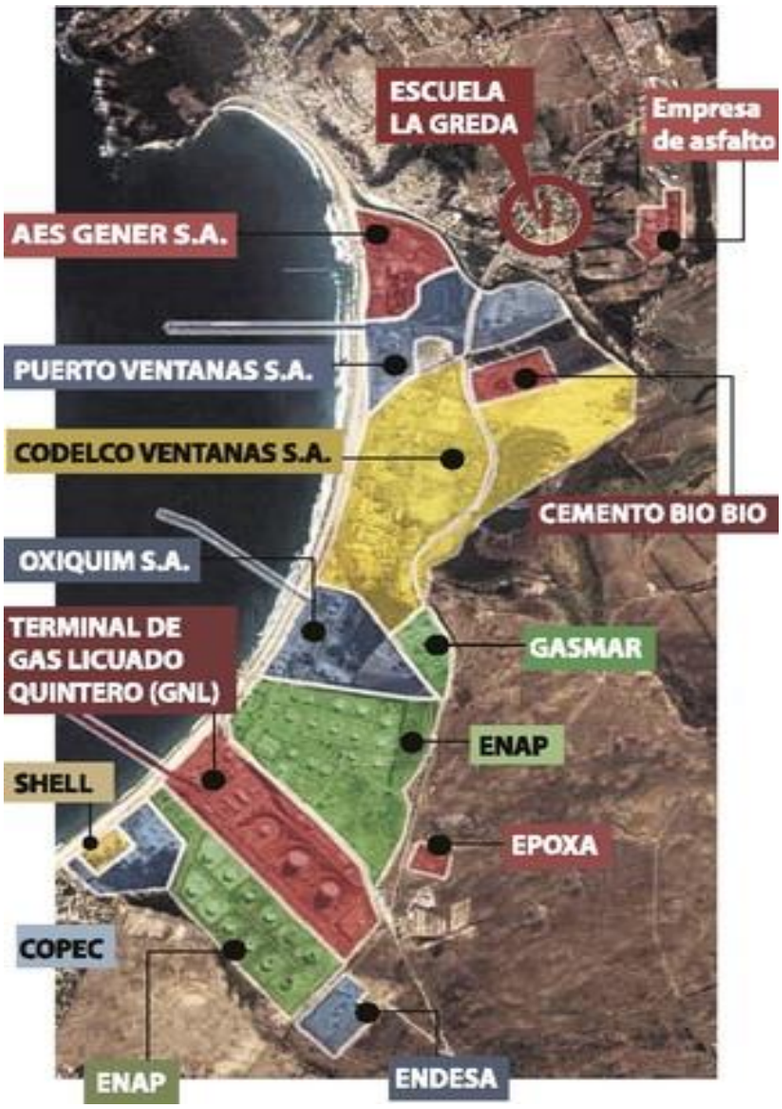
Simbología: E-9: Industrias peligrosas; E-10: Industrias molestas; A-6: Área urbana sector central; B-35: Área de extensión Fuente: Reproducida de la Ordenanza del PRIV.(D.O. 1°de marzo de 1965).

La comuna de Puchuncaví era fundamentalmente agrícola y pesquera, con pobladores dispersos en los campos, tras la instalación de la fundición y refinería, la zona se va transformando en un centro de desarrollo industrial. A pesar de esto, sigue siendo una de las comunas más pobres de la región de acuerdo a las encuestas de pobrezas nacionales, tanto así que hasta el año 2011 no contaba con sistema de alcantarillado ni de agua potable.

Desde 1993 ha sido declarada como saturada de contaminación.

La contaminación industrial ha provocado problemas en sus tierras, aguas, y aire, por lo que resulta muy difícil, subsistir económicamente a partir del cultivo o pesca, como antaño. Hoy los mismos pobladores de la zona se encuentran expuestos a enfermedades provocadas por la exposición a metales pesados, producto de las emanaciones del complejo industrial.

Fig 2-3. Complejo Industrial de Ventanas



Fuente ENAMI Ventanas

En la comuna de Puchuncaví, las industrias del CIV han contaminado progresivamente suelos, aguas, y aire, especialmente los sectores aledaños como Las Ventanas, La Greda, Los Maitenes, Loncura y Campiche. A fines de 1993 Puchuncaví fue declarada como zona saturada de SO2, PM10 y CO2. A raíz de esta situación en los últimos años han aparecido organizaciones ambientales de la zona, como el Consejo Ecológico de Puchuncaví y El Comité de Defensa de La Greda.

Algunos de ellos han presentado ante Tribunales recursos de apelación que han logrado paralizar la termoeléctrica Campiche, la presión no ha permitido instalar otra termoeléctrica en la zona (Proyecto Río corrientes del grupo de inversiones Southern Cross). A pesar de que la contaminación lleva 50 años en la zona, sólo en los últimos tiempos, esta ha sido tomada en cuenta por las autoridades.

2.4. FUNDICIÓN Y REFINERÍA DE VENTANAS

.

En Valparaíso a fines de la década de 1950, se suscita la discusión respecto de la posibilidad de instalar en sus costas cercanas, una fundición de cobre para procesar el mineral que hasta 1945 era trabajado en Chagres (Llayllay), la anterior fundición privada, había sido clausurada por problemas ambientales y que fue reabierta en 1959 (Folchi, 2006). El complejo industrial consideraba una refinería y fundición de cobre, que sería operada por la estatal Empresa Nacional de Minería (ENAMI), además de una central termoeléctrica de 110 MW que la abastecería de electricidad aportando también con energía eléctrica al naciente sistema interconectado. Esta planta sería operada por la Compañía Chilena de Electricidad (CHILECTRA) (Sabatini *et al.*, 1995).[21]

Las localidades propuestas fueron Papudo y Ventanas, presentándose desde un comienzo una fuerte oposición por parte de los agricultores de Papudo. Desde Valparaíso en cambio se ejercen presiones políticas para asegurar la instalación de la industria en la costa de Quintero. La discusión se zanja con una decisión política apoyada en informes técnicos de la época, que consideraban que la zona de Ventanas presentaba mejores condiciones para la dispersión de los gases que las otras zonas alternativas.

Desde un comienzo se proyectó que en Ventanas se considerara la instalación de una planta de producción de ácido sulfúrico (H_2SO_4), para captar una importante cantidad del Anhídrido Sulfuroso (SO_2) emitido en la fundición; per se inauguró sin la planta de ácido, postergándose en reiteradas ocasiones su construcción. La principal razón del aplazamiento de la planta, fue que la poca demanda de ácido sulfúrico, mostrando la incompatibilidad de los ciclos económicos y los ciclos ecológicos.

El Complejo Industrial de Ventanas se inaugura en 1964, compuesto por la fundición de ENAMI y la termoeléctrica a carbón de CHILECTRA, comenzando un nuevo ciclo en la historia de la localidad de Ventanas y de la comuna de Puchuncaví. En 1966 se inaugura la Refinería Electrolítica en los terrenos de ENAMI, además del muelle de CHILECTRA, para descargar el carbón utilizado como combustible por la central termoeléctrica.

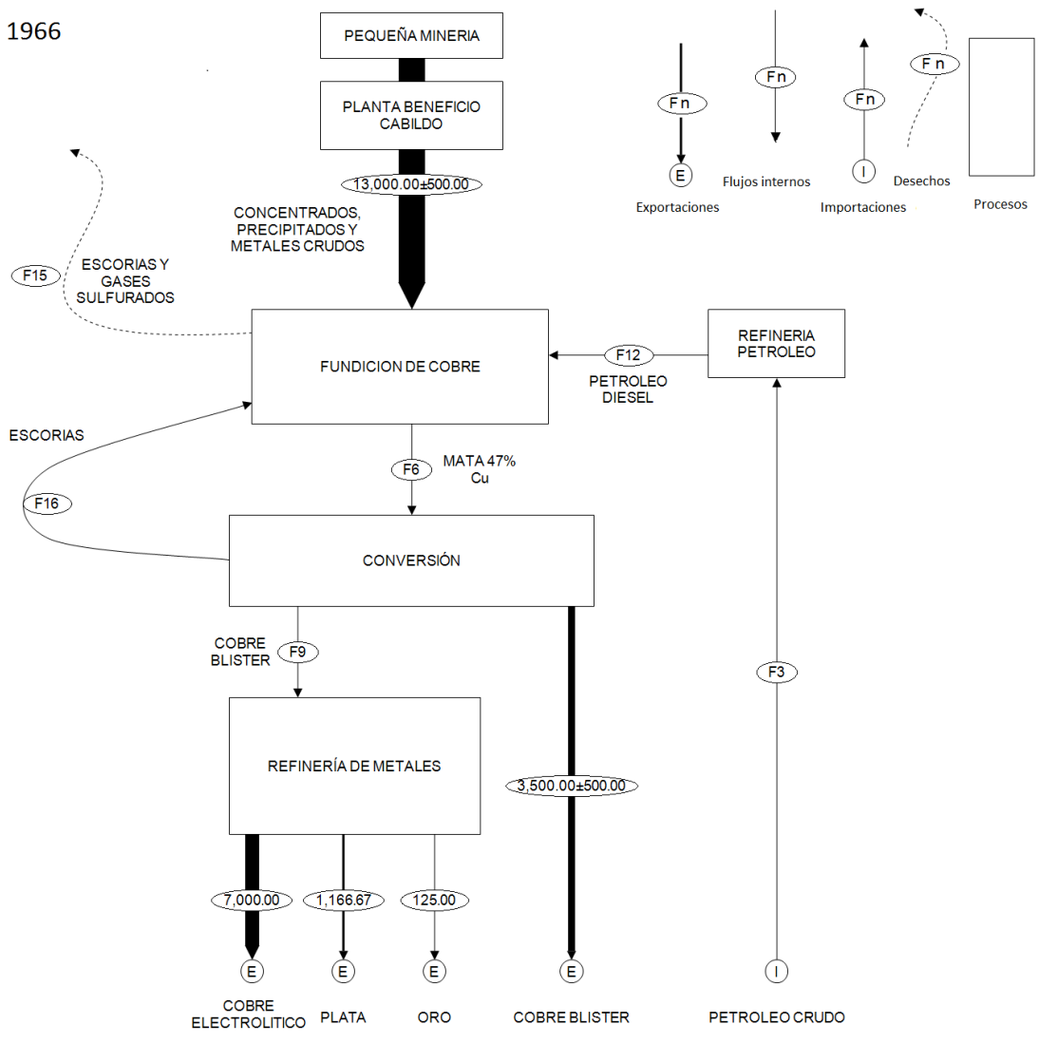
La primera tecnología usada en la fundición de metales, se basaba en el uso de un horno de reverbero, operado con petróleo, y con capacidad para alcanzar 1.400°C, el que permite la fusión de entre 12.500 y 13.500 toneladas mensuales de carga. La fusión era

[21] ROJAS Barrera, Gabriel. Op. Cit. Pág. 94.

complementada por dos convertidores Pierce Smith, que operan como unidades de fusión complementarias y permiten obtener cobre Blíster, con una pureza de 99%.

En septiembre de 1968 se inaugura un tercer convertidor que permitía obtener una producción de cobre Blíster de entre 3000 a 4.000 Ton mensuales y entre 25.000 a 30.000 TM anuales. En el caso de la refinería electrolítica, la industria se inauguró en 1966, con una capacidad de producción de 84.000 toneladas de cobre fino, además de 1.500 kg. de oro y 14.000 kg. de plata. [22].

Figura 2-4.: Esquema del proceso productivo del cobre en la fundición y refinería de cobre de Ventanas. Interpretado a partir de descripciones bibliográficas



Fuente: Memoria de título Gabriel Rojas

[22] ROJAS Barrera, Gabriel. Op. Cit. Pág. 96.

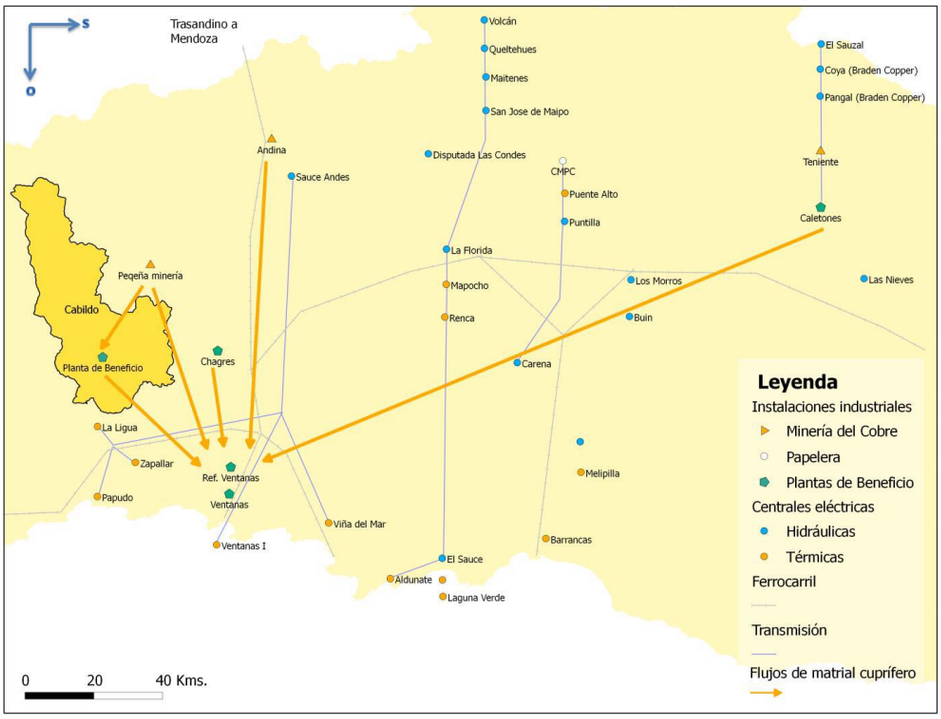
En un comienzo, el mineral que llega a la fundición y refinería de Ventanas, es casi exclusivamente, material extraído por la pequeña y mediana minería, de los valles interiores de la zona central, cumpliendo con el objetivo establecido por la ENAMI, en orden a ofrecer las capacidades de refino de la planta a los productores que obtenían un bajo precio en las fundiciones privadas, y que no podrían exportar el mineral que extraen, a los mercados internacionales. Durante 1965, producto de un estudio de ENAMI, se puso en marcha una planta de beneficio en la localidad de Cabildo, en la que se concentraba por flotación, una gran cantidad de cobre proveniente de pequeñas minas ubicadas en torno a este pueblo. El concentrado de cobre producido en Cabildo se constituía como el principal insumo para la fundición de Ventanas, con una producción en 1966 de 87.000 toneladas de cobre electrolítico. Luego se sumaran n al material procesado, concentrados provenientes de las fundiciones de Chagres y El Teniente.

ENAMI durante la segunda mitad de la década del 60, inicia una expansión proyectando nuevas plantas de beneficio, intensificando los programas de fomento, mecanización de las labores mineras entre otras medidas. La empresa se involucra además en labores de prospección y explotación mediante alianzas con productores privados en un régimen de sociedades mixtas. En esa época ocurre la inauguración del mineral de Andina, que termina siendo el principal proveedor de concentrado de cobre a la fundición de Ventanas, una vez iniciadas sus faenas a principios de la década de 1970..[23]

El gobierno del presidente Eduardo Frei Montalva, inicia una política de nacionalización que dará a la reforma constitucional de 1971, que decretará la nacionalización de nuestras mineras, haciendo que la gran minería del cobre sea administrada por CODELCO y así las plantas de fundición y refino de ENAMI, quedan en manos del Estado, y pese a la protección de las inversiones que estableció el nuevo marco institucional, el capital extranjero no acaparó inmediatamente la industria del cobre.

[23] FREDES, Juan & GUTIÉRREZ, Edgardo: "Estudio de las Variables de Producción, a través de su Impacto en los Costos Indirectos de Fabricación, en los Macro Procesos de Fundición y Refinería de la División Ventanas de CODELCO Chile, en el período Enero 2003 – Noviembre 2005" Memoria para optar al título de Ingeniero Comercial P.U.C.V. año 2006

Figura 2-5. Ubicación de los principales centros de producción cuprífera de la zona centro y su relación con la fundición y refinería de ENAMI Ventanas.



Fuente: Memoria de título Gabriel Rojas Barrera

La industria cuprífera estatal, integra los procesos, tanto de extracción como de refinación y fundición, a diferencia de la minería privada, que exporta básicamente mineral en estado bruto. Esta condición, sumada a la restricción de los negocios de ENAMI a la fundición y refinería de metales, favoreció la consolidación de la Fundición y Refinería de Ventanas, que durante este período crece significativamente. Es así como en 1979, la refinería de cobre inaugura un nuevo circuito de refinación que permitió aumentar de 82.000 a 160.000 toneladas la capacidad anual de producción de cobre fino, y hacia 1982, nuevas mejoras permitieron aumentar la producción a 210.000 toneladas anuales. [24]

Con respecto a la planta de ENAMI, se inaugura en 1979 un nuevo circuito de refinación, para en 1983 iniciar la puesta en marcha del convertidor Teniente, que reemplaza en gran medida la fusión realizada en el antiguo horno de reverbero.

[24] https://www.CODELCO.com/division-ventanas/prontus_CODELCO/2016-02-25/165525.html (Consulta 18 julio 2016).-

La propiedad de la Fundición y Refinería Ventanas a partir de Mayo del 2005 se traspasó desde la Empresa Nacional de Minería (ENAMI) a la Corporación Nacional del Cobre (CODELCO).

Por otra parte es necesario resaltar la puesta en servicio en 1977 de la segunda unidad generadora de la central termoeléctrica de Ventanas, con lo que comienza la expansión del complejo industrial de Ventanas, junto con la segunda unidad de Ventanas, se inaugura en 1980 el terminal de OXIQUIM, industria química que surge como una filial de SINTEX, una empresa dedicada a la fabricación de productos químicos que a partir de fines de la década de 1970 ingresa al negocio de los terminales marítimos para productos químicos, precisamente con la inauguración del terminal de Quintero.

Tabla 2-1. Unidades Productivas y Procesos en Fundición y Refinería

Macro Proceso	Unidad Productiva	Proceso
Fundición	Recepción y Mezcla	Manejo de Materiales Chancado y Selección
	Fundición	Secado Fusión Limpieza de Escoria Conversión
	Refino a Fuego	Horno Basculante Hornos Refino Moldeo
	Planta de Gases	Producción Ácido
Refinería	Refinería Electrolítica	Obtención Laminas Iniciales Obtención Cátodos Comerciales Tratamiento Electrolito
	Productos Metalúrgicos	Productos Intermedios Productos Finales
	Planta de Metales Nobles	Lixiviación Barro Anódico Planta de Selenio Horno TROF Electrólisis Plata Fundición Oro Refinación Oro

Fuente: Memoria de Título Juan Fredes & Edgardo Gutiérrez [25]

Actualmente, CODELCO División Ventanas tiene una capacidad anual de producción de 420.000 toneladas en su fundición, 400.000 toneladas en su refinería y 360.000 toneladas de ácido sulfúrico, se encuentra construyendo los más grandes proyectos ambientales de su historia, con una inversión que supera los U$160 millones, con el propósito de disminuir sus emisiones al ambiente y hacer más sustentable sus operaciones.

[25] FREDES, Juan & GUTIÉRREZ, Edgardo: "Estudio de las Variables de Producción, a través de su Impacto en los Costos Indirectos de Fabricación, en los Macro Procesos de Fundición y Refinería de la División Ventanas de CODELCO Chile, en el período Enero 2003 – Noviembre 2005" Memoria para optar al título de Ingeniero Comercial P.U.C.V. año 2006

Entre la carpeta de proyectos ya finalizados cuentan: un centro de concentrado, un kilómetro de cierres perimetrales, la captación de material particulado, un precipitador Electroestático y un nuevo filtro de mangas del secador de concentrado, la alimentación de carga fría, entre otros.

En etapa de ejecución se encuentran los proyectos de captura y tratamiento de humos fugitivos de los convertidores Pierce Smith, de Sangría Horno Eléctrico y de sangría del convertidor Teniente, además sistema de tratamiento de humos visibles de Refino a Fuego y el sistema de tratamiento de humos de cola de la Planta de Ácido Sulfúrico. [26]

[26] https://www.CODELCO.com/prontus_CODELCO/site/artic/20160330/pags/20160330130203.html (Consulta 1 agosto 2016).-

CAPITULO III

RESIDUOS DE LA FUNDICIÓN Y REFINERÍA DE VENTANAS

3. PRODUCCIÓN DE LA FUNDICIÓN Y REFINERÍA VENTANAS

La fundición y refinería Ventanas es un complejo metalúrgico con unidades de fundición, refinación, planta de ácido sulfúrico y hasta hace unos años con plantas de metales nobles (Au, Ag, Se, Te). Los minerales que alimentan la fundición provienen principalmente de la División Andina de CODELCO, Anglo American Sur, Las Cenizas, Los Pelambres y Valle Central, entre otros yacimientos.

Figura 3-1. Fundición y Refinería de Ventanas

Fuente Sustempo [27].

Al interior de la instalación, existen seis (6) proyectos que cuentan con Resolución de Calificación Ambiental cuyo titular es CODELCO y que corresponden a:

I. RCA N°48/1998 "Conversión a Gas Natural de los Procesos de Fundición Refinería de Ventanas de ENAMI";
II. RCA N°161/2004 "Planta de Tratamiento de RILES de Fundición y Refinería Ventanas";
III. RCA N°105/2005 "Planta Piloto Tratamiento de Polvos de Electrofiltros Fundición";
IV. RCA N°157/2007 "Quinto Horno Deselenización Planta Metales Nobles Ventanas";
V. RCA 462/2008 "Proyecto Optimización de Celdas Electrolíticas"; ya
VI. RCA N°1369/2009 "Proceso de Neutralización del efluente ácido de la Planta de Acido".

[27] http://sustempo.com/sma-formula-cargos-contra-codelco-por-fundicion-y-refineria-ventanas (Consulta 1 agosto 2016).-

Con respecto al “Sector Botadero” (el cual se encuentra colindante al Proyecto Fundición y Refinería Ventanas), este corresponde a un área utilizada por el titular para depositar residuos de los procesos de fundición y refinamiento de metales disponiéndose en mayor medida escorias de fundición. El transporte de dichos residuos se realiza mediante vía férrea, desde las instalaciones de fundición hasta el “Sector Botadero”.

El sector tiene una superficie aproximada de 136.000 m2, el cual actualmente está siendo utilizado para la disposición de Residuos Industriales Sólidos. A través del examen de información, se constató ha existido un aumento en la superficie utilizada para la disposición de residuos del Proyecto Fundición y Refinería Ventanas, pasando desde 7,9 a 15,1 hectáreas aproximadamente, en el periodo comprendido entre los años 2004 y 2013.

Por último, el “Depósito de Seguridad” (el cual se encuentra ubicado en las instalaciones del Proyecto Fundición y Refinería Ventanas) corresponde a un área utilizada por el titular para depositar residuos de los procesos de fundición, refinamiento, tratamiento de gases, entre otros. A diferencia del “Sector Botadero”, esta área se encuentra delimitada y su superficie abarca 11.479 m2 aproximadamente.

Figura 3.2. Escorial de Fundición Ventanas

Fuente: MMA. Ministerio del Medio Ambiente[28]

[28] https://www.google.cl/search?q=Esquema+general+procesos+fundicion+ventanas&imgrc=*(Consulta 12 agosto 2016)*.-

En el marco de su afán de reducir un 33% de emisiones de la división Ventanas, desde el 2015, se decidió no refinar más el oro y la plata, obteniendo con ello cero generación de riles en la planta de metales, lo que está dentro del plan de mitigar o disminuir el impacto ambiental que generaba esa operación". Según estadísticas de la empresa, desde 1964, cuando fue creada la planta de metales nobles, estas instalaciones han generado más de 16.500 barras de oro de 12,5 kilos cada una.[29]

Además, se constató que el "Sector Botadero" se encuentra emplazado en un área catastrada como Humedal, durante el año 2011. Además, cabe destacar que el área total de dicho humedal es de aproximadamente 277.000 m2.

Por otra parte, se constató la presencia de contaminantes en el suelo, principalmente Arsénico (As), el cual se encuentra entre 149 y 925 ppm.

3.1. ESCORIA DE COBRE

La escoria de cobre es un residuo del proceso pirometalúrgico. Por lo general, las escorias de cobre son óxidos de hierro silicatos $Si0_2$, aunque existen otros elementos, como silicio y aluminio que no superan el 20% por lo que no se toman en cuenta. Por otra parte, en la composición mineralógica es común la presencia de fayalita y magnetita, entre otras composiciones.

La escoria de cobre en general, se somete a un enfriamiento natural en el lugar del vertido, es depositada directamente en vertederos autorizados, en ocasiones, si posee una rentabilidad comercial y previa al vertido final, éstas pasan por un proceso de flotación que permite recuperar los metales contenidos en ella. Finalmente, la escoria resultante se vierte en lugares aptos para ello. La escoria se considera un pasivo ambiental y puede permanecer en los lugares de acopio por décadas, lo que involucra la ocupación de grandes extensiones de superficies de terreno.[30]

Las impurezas ejercen un papel negativo en sus propiedades, como su conductividad eléctrica, térmica, su color su dureza y demás; se pueden clasificar en tres grupos:

i. de fácil eliminado (Zn, Fe, 0 y S),
ii. impurezas que se eliminan parcialmente (As, Sb, Bi y Ni), e
iii. impurezas que no se eliminan (Au, Ag).

[29] https://www.veoverde.com/2012/10/CODELCO-ventanas-anuncia-que-no-refinara-oro-ni-plata-para-2013/ (Consulta 11 agosto 2016).-
[30] OYARZÚN Kneer, Iván Alejandro. "Influencia de las escorias de cobre en la fabricación de hormigón" Tesis para optar al título de Ingeniero Civil en Obras Civiles Universidad Austral de Chile, Valdivia, 2013

Todas las escorias poseen, en alguna medida, bondades para la purificación del efluente metálico y en particular, estas escorias tienen un rol durante la pirorrefinación, en la disolución de impurezas de la fase metálica.

Según Mackey, seis son las características más importantes que deben poseer las escorias de extracción de cobre, para asegurar la mayor eficiencia durante la operación pirometalúrgica:

i. La escoria debe encontrarse completamente líquida a la temperatura de fusión del metal o de la mata.
ii. La escoria debe ser fácilmente manejable durante el proceso; esto es, debe existir un compromiso entre baja viscosidad.
iii. Las escorias que van a descarte deben contener mínimas cantidades del metal, disuelto o en suspensión.
iv. El rango de operación de la escoria debe ser tal, que admita variaciones tanto en la composición de la escoria misma como en la alimentación al reactor sin producir trastornos de funcionamiento.
v. La escoria debe asegurar una buena eliminación de los elementos menores no deseados.
vi. Las escorias, como en cualquier sistema metalúrgico, suelen representarse por diagramas de equilibrio, conocidos también como diagramas de fases.[31]

En los últimos años, ha habido un creciente interés en buscar alternativas de uso para éstas. La escoria de cobre es usada en diversos sectores productivos como:

i. sustituto parcial del cemento hidráulico,
ii. gravilla para líneas de ferrocarriles,
iii. árido en mezclas asfálticas de obras viales,
iv. árido constituyente de los morteros y hormigones de cemento,
v. abrasivo en la limpieza por chorro de arena de estructuras metálicas y
vi. albañilerías de bloques de escoria moldeados.

Los estudios más recientes están enfocados a la utilización de las escorias como un material que reemplace en forma parcial al cemento Portland, en ese sentido, los resultados que se han informado ratifican que algunas escorias de cobre tienen propiedades cementosas y pueden considerarse materiales alternativos al cemento. En

[31] ARIAS, Vladimir, CORONADO Falcón Rosa, LOVERA Dávila Daniel F., "La valoración de las escorias metalúrgicas como recursos industriales", Revista del Instituto de Investigación FIGMMG, Vol 7, N.° 13, 26-30 (2004) Universidad Nacional Mayor de San Marcos ISSN: 1561-0888 (impreso) / 1628-8097 (electrónico) (Consulta 12 agosto 2016).-

estudios realizados en nuestro país, se obtienen resultados comparativos de la resistencia a la compresión de hormigones fabricados con áridos de escoria de cobre de la Fundición Hernán Videla Lira (Paipote) versus un hormigón con áridos convencionales de río, observándose que a los 28 días de edad, la resistencia a la compresión del hormigón con escoria de cobre fue 34 % mayor que en el hormigón convencional.[32]

Además a pesar de ser un desecho, cumple un rol importante durante el proceso producción del metal rojo, ya que sus componentes, disminuyen el punto de fusión (1200°C), lo cual es conveniente para la operación del proceso.

En los procesos industriales para la obtención de los metales, la escoria se define como una fase vítrea que se forma a partir de la ganga proveniente de los minerales.

A escala mundial, se generan alrededor de 24,6 millones de toneladas de escoria anualmente. La mayor parte de estas, se vierte sin reciclaje apropiado. [33]

En Chile, la escoria de cobre no tiene un uso industrial masivo, a nivel mundial se han realizado variadas experiencias de usos, en particular en la industria de la construcción con buenos resultados. Poblaciones asentadas en lugares próximos a las fundiciones de cobre han aprovechado las escorias como un material de construcción basado en bloques de escoria moldeada.[34]

Se ha usado como materia prima en la fabricación de cemento, como sustituto de áridos tanto en hormigones como en morteros de cemento, también se han usado en el pulido y limpieza por chorro abrasivo de estructuras metálicas y como gravilla en obras viales entre otras aplicaciones comerciales se han desarrollado manuales técnico para el uso de escorias de cobre en morteros y hormigones en China.[35].

En morteros de cemento con escoria de cobre, estudios sobre el comportamiento mecánico en los procesos con chorro abrasivo, se observa un incremento de su resistencia a la abrasión. [36]

---

[32] AGUILAR, C., NAZER, A., PAVEZ, O. y ROJAS, F.: "Una revisión de los usos de las escorias de cobre", IBEROMET XI, X CONAMET/SAM 2 al 5 de noviembre de 2010, Viña del Mar, CHILE

[33] GORAI, B., JANA, R.K., & PREMCHAND, "Characteristics and utilization of copper slag--a review," Resources, Conservation and Recycling, vol. 39, 2003, pp. 299-313.

[34] SPRY, N., "Blocks in Gloucestershire - A survey.," Industrial Archaeology, 2003, pp. 36 - 58

[35] BEHNOOD, A., MEYER, C. & SHI, C., "Utilization of copper slag in cement and concrete," Resources, Conservation and Recycling, vol. 52, 2008, pp. 1115-1120

[36] BASTOS, A.M., CACHIM, P. & RESENDE, C, P. "Copper Slag Mortar Properties," Materials Science Forum, vol. 587-588, 2008, pp. 862-866.

En Australia se comercializan hormigones con escorias de cobre. Algunos países han regulado el empleo de finos de escorias como aditivo para el cemento, contando con las normas, DIN 4226; BS 6599; BS EN 12620; ASTM C 989, entre otras.[37]

3.2. ORIGEN DE LAS ESCORIAS DE FUNDICIÓN

Durante la fundición del mineral concentrado de cobre se producen dos fases líquidas inmiscibles entre sí, las que se pueden clasificar como: mata rica en cobre (sulfuro) y la escoria (óxido). La mata pasa a procesos posteriores de conversión, mientras que la escoria fundida se descarga directamente o pasa a procesos de recuperación de cobre, logrando que tengan un porcentaje menor al 1% de cobre antes de ser descartadas. En las etapas de recuperación de cobre en hornos de limpieza tipo Teniente, es posible recuperar el cobre contenido en escorias de alta ley, las que se encuentran entre el 4 y el 10% de cobre, que provienen de los procesos de fusión (horno) o conversión.

Actualmente Chile se usan tres procesos para el tratamiento de escorias para obtener una escoria con una ley lo más baja posible de cobre. Estos procesos son:

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

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

El horno de tratamiento de escoria posee las siguientes etapas:

1. Carga del horno
2. Reducción de la magnetita: la que representa una disminución de la viscosidad de la escoria, que permite la separación de las fases contenidas en la escoria. Se trabaja

[37] http://iberomet2010.260mb.com/pdfcongreso/t5/T5-36_nazer_n1_FINAL.pdf?i=1 (Consulta 12 agosto 2016).-

con hornos a temperaturas superiores a los 1200 °C, y al ser las reacciones endotérmicas, es necesario generar calor por medio de quemadores.

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

El tamaño de los botaderos de escoria posee un crecimiento anualmente, por lo que la reutilización de escorias se ha convertido en un tema de gran interés para las empresas metalúrgicas. Anualmente las fundiciones de cobre del país producen cerca de 4,5 millones de toneladas de desechos, cuyo único destino posible son los depósitos que se sitúan cerca de las plantas.

Estudios realizados por diversas universidades nacionales han determinado que por cada tonelada de cobre producido se generan aproximadamente 2,2 toneladas de escoria, y que tan sólo la División del Teniente, CODELCO, produce cerca de 700.000 toneladas de escoria al año. Se estima que Chile posee un volumen histórico acumulado de aproximadamente 50 millones de toneladas.

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

3.3. CARACTERÍSTICAS DE LA ESCORIA DE FUNDICIÓN

Como ya hemos mencionado la escoria está formada por los óxidos contenidos en la carga del horno y de los óxidos de hierro que se producen por la oxidación durante el proceso piro-metalúrgico. Dependiendo de la naturaleza de los minerales, de los concentrados, de los fundentes, de las condiciones de operación y de otros factores. Los óxidos que se presentan en la escoria son:

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

Tabla 3-1 Composición de la escoria

	Hitashi	Naoshima	Harjavalta
Origen de la escoria	Escoria del convertidor	Escoria del convertidor	Escoria del horno de fundición instantánea
Composición de la escoria			
%Cu	4,0	3,0	1,0-1,5
%SiO_2	20,0	19,0	29,0
%Fe	46,0	49,4	44,0
%Fe_3O_4	20,0	25,0	13,0

Fuente: Biswas & Davenport, 1993

Como se observa de la Tabla 3.1 la escoria de fundición posee una serie de compuestos de importancia industrial, que si pudieran ser recuperados, podrían tener un interés económico considerable. Uno de los elementos que se encuentra en la escoria en mayor porcentaje es el hierro, que es de gran importancia para la industria siderúrgica. El hierro es un recurso no renovable, por lo que continuamente las empresas de extracción de ese rubro están buscando alternativas de obtención de este mineral, lo que significaría que su recuperación de escorias de fundición generaría un importante aporte para dichas empresas.

3.4. COMPOSICIÓN DE LA ESCORIA DE COBRE

La composición física y química, depende de la materia prima usada y de la tecnología empleada. Están constituidos tanto por fases vítreas como cristalinas. Las escorias se producen a partir de los 1600°C, al ser líquidas su estructura amorfa-cristalina dependerá de la forma de enfriamiento. Si es rápido la estructura queda colapsada y es mayoritariamente amorfa y sus propiedades serán las de un material altamente reactivo. En cambio, si el enfriamiento es lento, tenemos menor cantidad de estructura amorfa o vítrea, predominando estructuras cristalinas impidiendo la formación de nuevos enlaces.[38]

3.4.1. Composición Física

La escoria de cobre puede tener diferentes formaciones, las que van en directa relación a las propiedades físicas. Sin embargo, se pueden asemejar ciertas características, que se indican en la tabla 3.2. siguiente:

[38] OYARZÚN Kneer, Iván Alejandro. "Influencia de las escorias de cobre en la fabricación de hormigón" Tesis para optar al título de Ingeniero Civil en Obras Civiles Universidad Austral de Chile, Valdivia, 2013, página 15

Tabla 3-2: Principales características física de la escoria de cobre

Apariencia	De color negro, Textura lisas para las de botadero y porosas para las Granalladas
Forma de las Particulas	Irregular con bordes agudos.-
Densidad (kg/m3)	3160-3870
Abosorción de Agua (%)	0,15-0,55
Dureza	4-6
Granulometrias	Variada según su formación. Desde 4" hasta material fino menor a 0,08mm

Fuente: Tesis Oyarzún U.A.CH [39]

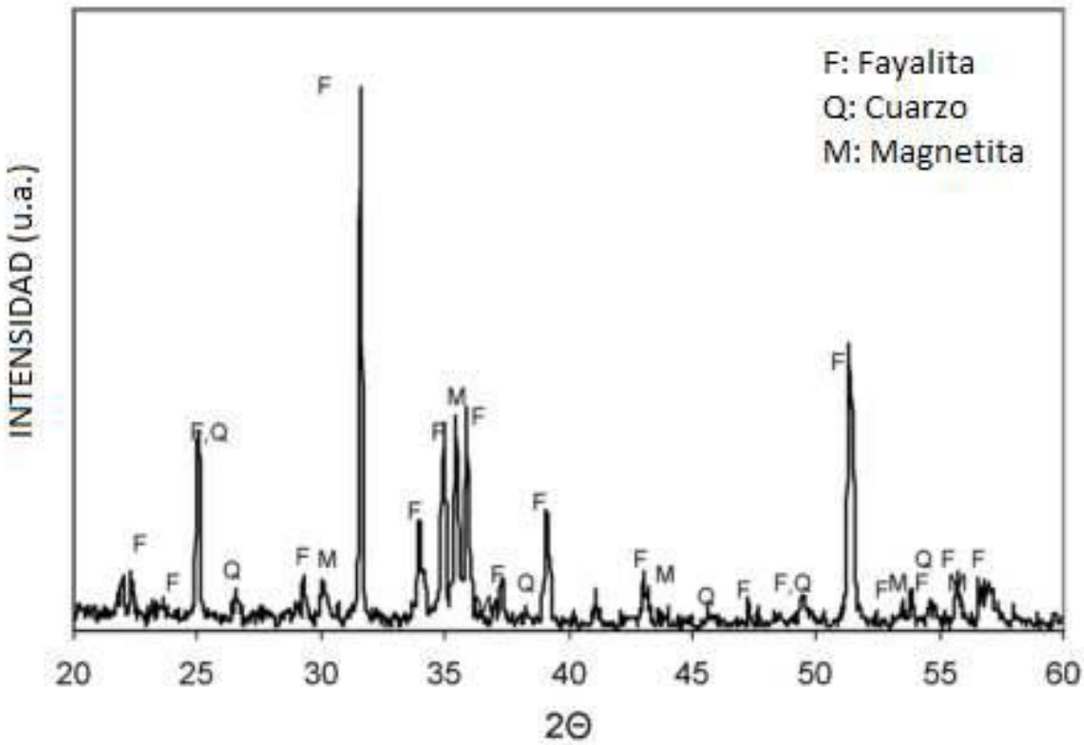
En la fase vítrea, reside el componente hidráulicamente activo de la escoria, pudiendo ser considerada la fase cristalina prácticamente como Inerte. La fase Amorfa o Vítrea, supera el 69% en el caso de la escoria de alto horno, siendo uno de los puntos que favorece el aumento de la resistencia a compresión al fabricar hormigón con estas escorias.

3.4.2. Composición cristaloquímica

Las escorias de cobre, contienen un gran contenido de óxidos, también se caracteriza por contener altos contenidos de Hierro, donde las principales especies componentes son la Fayalita y Magnetita, además, podemos encontrar Óxidos de Calcio, Aluminio ($CaAl_2O_4$), Silicato de Cinc (Zn_2SiO_4), y Óxidos de cobre Hierro ($CuFe_2O_4$).

Figura 3-3: Difractograma de escoria de cobre de la minera
"The Black Sea Cooper Works" (Samsun, Turquía).-

[39] Idem página 16



Fuente: Alp et al, (2008) [40]

En diferentes estudios, se observa que las escorias de cobre, poseen composiciones similares. La tabla 3.3., muestra los resultados obtenidos por varios autores en las cuales se destacan: Fe_2O_3 mayores a 60%, así también la SiO_2 concentraciones mayores a 20%, sin embargo otros óxidos tales como el ZnO, CaO, y Al_2O_3 están levemente sobre el 2%, además, otros metales pesados bajo el 1%.[41]

Tabla 3-3: Óxidos elementales de escorias de cobre, análisis mediante florescencia,

Origen/Concentración (%)	Fe_2O_3	SiO_2	ZnO	CaO	Al_2O_3	CuO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	TiO_2	PbO_2	CoO	MnO_2	MoO_3
Botadero Ventanas, Chile	68,85	19,08	2,26	2,07	2,59	1,08	0,95	0,75	0,55	0,73	0,31	0,12	0,12	0,11	0,09
Caletones (Orizola 2006)	66,76	22,76	0,29	1,23	3,44	1,43	0,76	0,68	0,68	0,61	0,52	0,04	-	0,04	0,36
Brasil (Moura 1999)	55	26	0,9	2	-	1,4	2,7	1,1	0,6	-	-	-	-	-	-
(Al-Jabri 2011)	53,42	33,05	-	6,06	2,79	0,46	1,56	0,28	0,61	1,89	-	-	-	0,06	-

Fuente: Tesis Oyarzún (2013) [42]

Mediante Fluorescencia de Rayos X (FDX), es posible precisar los principales componentes de un material. La tabla 3.4., muestra las concentraciones de los elementos

[40] ALP, I.; H. DEVECI; H. SÜNGÜN. 2008. Utilization of flotation wastes of copper slag as raw material in cement production. Revista Journal of Hazardous Materials. (159): 390-395.-

[41] AL-JABRI, K., BAAWAIN, M., TAHA, R., AL-KAMYANI, Z. S., AL-SHAMSI, K., ISHTIEH, A. (2013). Potential use of FCC spent catalyst as partial replacement of cement or sand in cement mortars. Construction and Building Materials, 39(0), 77-81.

[42] OYARZÚN Kneer, Iván Alejandro. "Influencia de las escorias de cobre en la fabricación de hormigón" Tesis para optar al título de Ingeniero Civil en Obras Civiles Universidad Austral de Chile, Valdivia, 2013, página 15

y óxidos presentes en una muestra de escoria de cobre de la Fundición Ventanas de CODELCO.

Tabla 3-4: Análisis de Fluorescencia de Rayos X,
Muestra de la fundición Ventanas de CODELCO.

ELEMENTO	CONCENTRACION (%)	OXIDO	CONCENTRACION (%)
Fe	48,16	Fe_2O_3	68,85
O	34,76	--	
Si	8,92	SiO_2	19,08
Zn	1,82	ZnO	2,26
Ca	1,48	CaO	2,07
Al	1,37	Al_2O_3	2,59
Cu	0,86	CuO	1,08
Mg	0,57	MgO	0,95
Na	0,55	Na_2O	0,75
K	0,46	K_2O	0,55
S	0,29	SO_3	0,73
Ti	0,18	TiO_2	0,31
Pb	0,10	PbO_2	0,12
Co	0,09	CoO	0,12
Ba	0,07	BaO	0,07
Mn	0,07	MnO_2	0,11
Mo	0,06	MoO_3	0,09
Cr	0,03	Cr_2O_3	0,05
Sb	0,03	Sb_2O_5	0,04
Ni	0,02	NiO	0,03
P	0,02	P_2O_5	0,06
Sn	0,01	SnO_2	0,02
Zr	0,01	ZrO_2	0,02
Sr	0,01	SrO	0,01

Fuente: Tesis Oyarzún (2013) [43]

3.5. CLASIFICACIÓN DE LAS ESCORIAS DE COBRE

[43] OYARZÚN Kneer, Iván Alejandro. "Influencia de las escorias de cobre en la fabricación de hormigón" Tesis para optar al título de Ingeniero Civil en Obras Civiles Universidad Austral de Chile, Valdivia, 2013, página 15

Las escorias de cobre se pueden clasificar según:

- El grado de silicatos
- El tiempo de enfriamiento
    - Escoria granallada
    - Escoria de botadero
    - Escoria expandida

3.5.1. Según grado de silicatos

La formación de la escoria de cobre se inicia en la etapa de fundición, por la adición de SiO_2 y/o CaO como fundentes, se forma así escoria fallalítica ($2FeO•SiO_2$). La composición de la escoria es en base a óxidos, donde se encuentran Óxidos de Fierro (Fe_3O_4), Oxido de sílice (SiO_2), Óxidos de Aluminio (Al_2O_3), Óxidos de Calcio (CaO), entre otros.

La sílice en esa combinación tiene la condición ácida, al igual que la alúmina, con una proporción comparable a la sílice. Mientras los otros componentes tiene el carácter básico.

Las escorias fundidas reaccionan por contacto, esta acción es muy diferente dependiendo de si su carácter químico es ácido o básico.[44]

Para evaluar este carácter se usan los índices de Silicatación, en donde se calcula en base de la razón entre el contenido en oxigeno de la proporción sílice que forma la escoria, y el contenido en oxigeno de la proporción de todos los otros óxidos que la forman (incluso Al_2O_3).

3.5.2. Según el tiempo de enfriamiento

La escoria de cobre, la podemos obtener en terrenos cercanos a las Fundiciones a temperatura ambiente. El tiempo que demore en llegar desde la temperatura en estado líquido a la final de disposición, cumple un rol fundamental en la formación de fases Cristalinas o Vítreas, afectando el poder de reactividad del material.[45]

3.5.2.1. Escoria Granallada

[44] ANGIOLANI, Argeo, "Química Industrial, fundamentos químicos y tecnológicos", Editorial Andrés Bello, Santiago de Chile, 1960, página 369.
[45] ROJAS, F. 2004. Estudio de prefactibilidad técnica del uso de la escoria de cobre en materiales de construcción. Tesis Ingeniería Civil Metalúrgica. Atacama, Univ. de Atacama, Fact. Ingeniería 165p.-

Esta escoria, se obtiene al pasar de estado líquido a sólido en el menor tiempo posible. Existen varias técnicas para ello, entre ellas, la usada en Caletones que consiste en verter la escoria fundida, en un pozo de granulación o granallador ver figura 3.4., el que mantiene una cantidad de agua constante que se renueva de acuerdo a la granulación que se realice, en su interior se produce un enfriamiento brusco de la escoria, pasando de estado líquido a sólido, desde una temperatura aproximada de 1150 °C a menos de 100 °C respectivamente. Producida la granulación, es separada el agua de la escoria, siendo llevada posteriormente a canchas de acopio.

En el proceso no hay reacciones químicas que alteren su composición, si ocurren cambios mecánicos y físicos por el cambio de estado fundente a granos sólidos, se forma un material constituido principalmente por una estructura amorfa o vítrea. Esta forma, provee a la escoria de cobre una mayor porosidad, aumentando la absorción de agua y una menor masa por unidad de volumen.

Figura3-4. Granallador

Fuente: Getty Images

La granalla es uno de los materiales mayormente utilizados como abrasivo, este se puede encontrar en forma de partículas redondas o angulares.

Figura 3-5.: Escoria Granallada Fundición Paipote de ENAMI.

Fuente: ENAMI

Posee una composición química de alto porcentaje de carbono, es un mineral abrasivo libre de contaminantes tóxicos (cianuro, ácido sulfúrico, arsénico, cadmio, etc.) Gracias a sus propiedades fisicoquímicas la granalla funciona como un reemplazante ideal de arenas cuarcíferas. La granalla por su bajo índice de sílice reduce el riesgo de padecer enfermedades producidas comúnmente por la arena. Con un rendimiento entre un 35% y un 40% superior a la arena.

3.5.2.2. <u>Escoria de Botadero</u>

Se obtienen por un proceso de enfriamiento lento, directamente en el lugar de acopio definitivo o algún espacio especialmente acondicionado, desde donde es llevada a disposición final. En la figura 3.6., se muestra como es vertida escoria en estado líquido, las cual se enfriara lentamente hasta alcanzar la temperatura ambiente.

Figura 3-6. Escoria Botadero Fundición Ventanas de CODELCO.

Fuente: Pool (2011).

Este tratamiento, facilita la cristalización del material, reduciendo la porosidad y limitando la posibilidad de reacción en procesos posteriores. Se detecta un menor porcentaje de absorción de agua y es más densa que las granalladas.

3.5.2.3. Escoria Expandida

Se obtiene por un rápido enfriamiento, se expande por la aplicación de una cantidad controlada de agua, aire y vapor. La solidificación acelerada aumenta su naturaleza vesicular produciendo un material ligero, que luego s triturado y clasificado por fracciones, para darle un mayor valor tecnológico a las escorias. [46]

3.6. ESCORIA Y MEDIO AMBIENTE

El Ministerio del Medio Ambiente, define escoria:

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

En la legislación existente sobre emisión de residuos sólidos mineros, se encuentra en la Ley Nº 19.300, sobre bases generales del medio ambiente, en donde no se establece una normativa específica, como tampoco en su reglamento.

Debido a que no establece una definición general de lo que se entiende por residuo. El código sanitario, que data de 1967, ha señalado que es necesario elaborar reglamentos que fijen las condiciones de saneamiento y seguridad relativas a la acumulación, selección, industrialización, comercio o disposición final de basuras y desperdicios.

Los residuos mineros son los que cuentan con una mayor cantidad de normas y permisos específicos, donde los que son de directa importancia para el presente trabajo son aquellos permisos relacionados con los depósitos de botaderos. Los procedimientos están descritos en el Título VII del D.S. N° 132/2004 del Ministerio de Minería, Reglamento de Seguridad Minera y los permisos para evacuar, tratar o disponer residuos industriales, descrito en el artículo 91 del SEIA, el que alude al artículo 71 letra b) del

[46] ROJAS, F. 2004. Estudio de prefactibilidad técnica del uso de la escoria de cobre en materiales de construcción. Tesis Ingeniería Civil Metalúrgica. Atacama, Univ. de Atacama, Fact. Ingeniería 165p.-

Código Sanitario, construcción, modificación y ampliación de cualquier obra destinada a la evacuación, tratamiento o disposición final de residuos industriales o mineros. (Cochilco, 2004)A pesar de que existen legislaciones que regulan el almacenamiento adecuado de las escorias de fundición posterior a su procesamiento, estas legislaciones no contemplan la revaloración, recuperación, reutilización ni reciclaje de las escorias, lo que contribuiría a la descontaminación del medio ambiente.

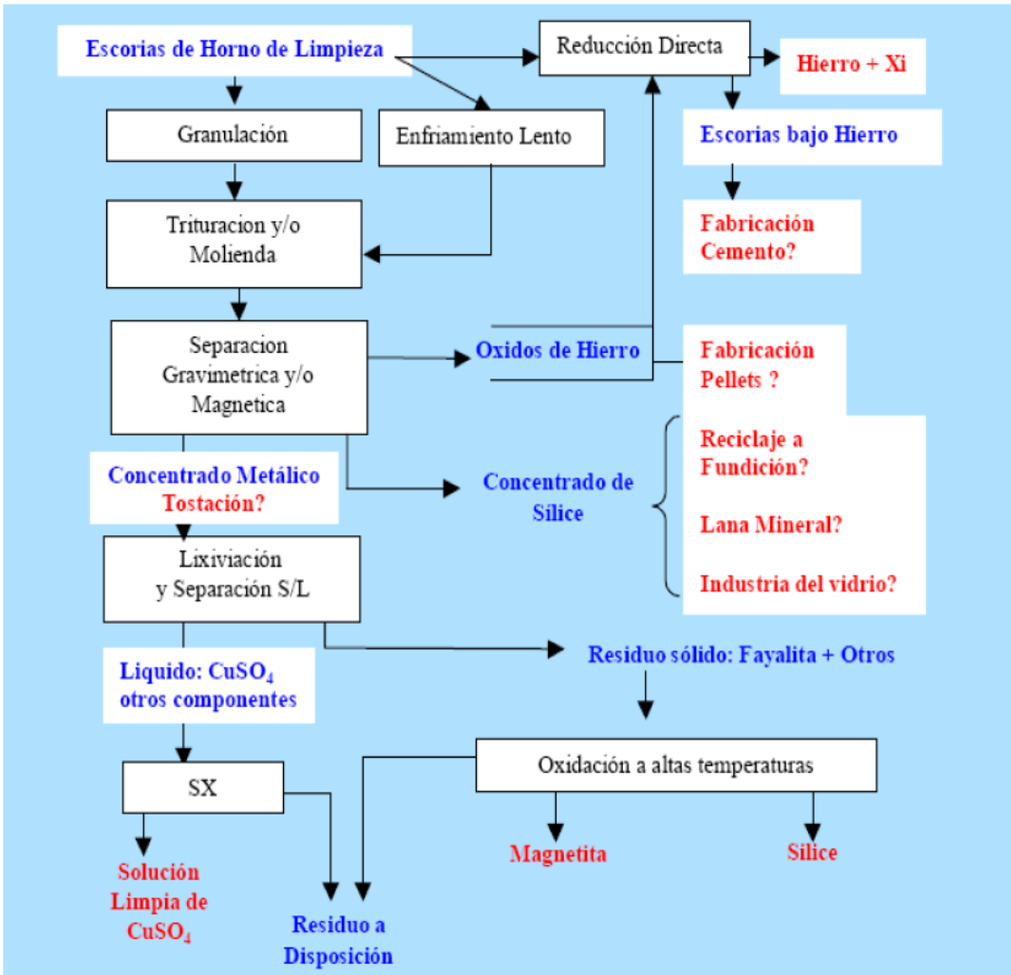
CAPITULO IV

REUTILIZACIÓN DE LA ESCORIA DEL COBRE

4. USOS DE LA ESCORIA DE COBRE

La reutilización de las escorias de fundición de cobre es menor; pero actualmente es una preocupación latente para el gobierno, como para la industria minera debido al impacto medioambiental que está produciendo, se han ido creando diversos usos alternativos de la escoria, para reducir el tamaño de los botaderos existentes hoy en día.

Figura 4-1. Generación de escorias y propuestas de tratamiento



Fuente: 1er Workshop Reciclaje y recuperación metales [47]

A nivel mundial existen una serie de usos para la escoria de fundición del cobre, entre los principales se pueden señalar;

- Balasto
- Arena abrasiva
- EbonyGrit
- Adocretos

[47] REYES, Pedro; SÁNCHEZ, Mario y VALENZUELA, Armando: ”Opciones para el manejo y comercialización de escorias de cobre”. Primer workshop de Reciclaje y Recuperación de metales y materiales, Santiago, Abril 2010.

4.1. BALASTO

Es el relleno en las líneas férreas, usado para formar una cama en las mismas, lo que le permite ser más firme y sólida. También es usado como lastre en barcos, la escoria es depositada en el fondo del barco para hundirlo un poco más en el agua, y así evitar volcamientos.

4.2. ARENA ABRASIVA

Se compone de material de silicato de Hierro y óxidos metálicos, se forman al inactivarse los slags fundidos en agua fría. Este enfriamiento fractura la escoria en gruesas partículas otorgando formas angulares, es ideal para muchas aplicaciones abrasivas

Los slags de Cobre se forman con un corte rápido, de alta calidad, es una opción económica para los astilleros y contratistas. Se ha demostrado ser lo mejor en abrasivos por la velocidad de corte y por el costo por metro cuadrado

Facilita remover la pintura, capas externas y corrosión de estructuras industriales. Se realiza mediante una fuerza mecánica que impulsa las partículas abrasivas contra superficies metálicas o no metálicas, removiendo contaminantes o condicionando la superficie para un tratamiento posterior. En inglés es conocida como *Sand Blasting*. La escoria viene con forma cúbica, y por lo tanto con sus lados bastante afilados, generando un mejor poder abrasivo. Estos productos abrasivos a su vez generan una baja cantidad de polvo. Además su uso no genera problemas a la salud para las personas. [48]

4.2.1. EbonyGrit

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

[48] SEPÚLVEDA Estay, Consuelo: "Utilización de escorias de fundición para la producción de compuestos de Hierro, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Químico, Universidad de Chile, Santiago - 2006

4.3. ADOCRETOS

Existe un estudio del uso de escorias de cobre en la elaboración de prefabricados de hormigón, a partir del reciclaje de este residuo metalúrgico desde tres escoriales abandonados de la Región de Atacama. Con este propósito se estudió la factibilidad técnica-económica de un proyecto de construcción y puesta en marcha de una planta industrial productora de pavimentos de adocretos utilizando escorias de cobre en reemplazo de áridos normales. En el desarrollo del trabajo se presentan antecedentes sobre la obtención de la materia prima, el proceso de fabricación de prefabricados, el estudio de mercado y la evaluación económica. Los resultados obtenidos en este trabajo permiten concluir que el proyecto de fabricación de adocretos de hormigón utilizando escorias de cobre tiene viabilidad de producción y es económicamente rentable. [49]

4.4. MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

Diversos estudios buscan la reutilización de la escoria en materiales de construcción, especialmente como aditivo para cementos, reemplazando las puzolanas y el yeso, especialmente en el mejoramiento en la tecnología de la construcción de carreteras [50].

4.4.1. Cemento Portland

En acuerdo con las características químicas y mineralógicas de la escoria de cobre, este residuo sólido industrial puede ser utilizado en el proceso de fabricación de clínker Portland como sustituto parcial de los minerales de sílice y hematita en la formación de mezclas crudas cuyos beneficios serían: disminución de los costos de producción de mezclas crudas y del consumo calorífico.[51]

Básicamente, el cemento Portland es un conglomerante o cemento hidráulico. Es el más usual en la construcción, utilizado como aglomerante para la preparación del hormigón o concreto. Como cemento hidráulico tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua, al reaccionar químicamente con ella para formar un material de

[49] NAZER, A "et al": "Uso de las escorias de cobre en la fabricación de adocretos de hormigón por Revista de la Facultad de Ingeniería, Instituto Tecnológico, Universidad de Atacama, Copiapó, (2013), pág. 23-31.

[50] RAMANACHANDRA Rao, S.R.: "Resource recovery and recycling from metallurgical wastes"; Elsevier B.V.; Oxford, U.K. 2006, Pág.335.

[51] AGUILAR Elguézabal, A., GARCÍA Medina, I.E. y ORRANTI Borunda, A. "Uso de la escoria de cobre en el proceso de fabricación de clinker para cemento Portland" Revista Materiales de Construcción, N° 281 España 2006

buenas propiedades aglutinantes.. Los principales materiales utilizados en la fabricación del Portland según Gomá figuran en la Tabla siguiente [52]

TABLA 4-1 COMPOSICIÓN CEMENTO PORTLAND

MATERIALES	**PORCENTAJE**
Óxido de calcio	44%
Óxido de silicio	14,5%
Óxido de aluminio	3,5%
Óxido de hierro	3%
Óxido de manganeso	1,6%.

Fuente: Gomá (1979)

Estos son mezclados y calentados en un horno rotatorio, de forma cilíndrica (Kiln), dispuesto horizontalmente, con una leve inclinación, que rota lentamente. La temperatura en reactor hasta llega a 1400°C, que permite que los minerales se combinen pero sin fundirse ni vitrificarse.

En la zona de baja temperatura, el carbonato de calcio, se disocia en óxido de calcio y dióxido de carbono (CO_2). En la zona de alta temperatura el óxido de calcio reacciona con los silicatos y forma silicatos de calcio (Ca_2Si y Ca_3Si). Se forma también una pequeña cantidad de aluminato tricálcico (Ca_3Al) y ferroaluminatotetracálcico (Ca_4AlFe). El material resultante es denominado clinker. Para mejorar las características del producto final, al clinker se agrega aproximadamente el 2% de yeso y la mezcla es molida finamente. El polvo obtenido es el cemento preparado para su uso.

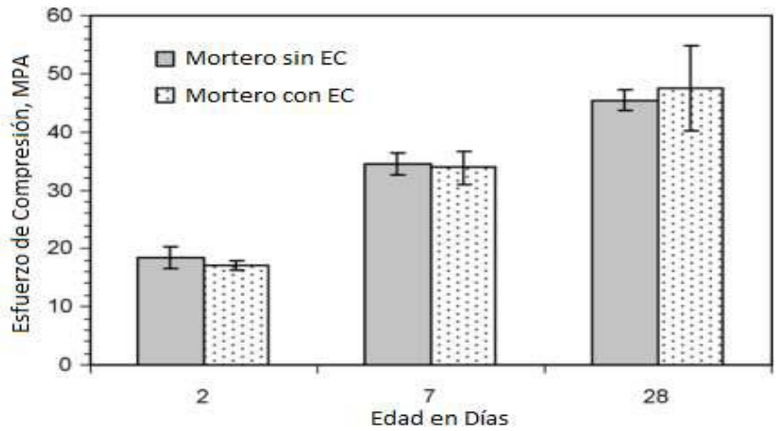
Numerosos investigadores han analizado la utilización de la escoria de cobre, como Medina "*et al"* (2006), en el reemplazo parcial de minerales de sílice y hematita en la formación de mezclas crudas, por otra parte Alp "*et al"* (2008)[53], utilizó un método industrial de fabricación de cemento Portland, incorporando la escoria de cobre en la fabricación de clínker. Se consideró la escoria de cobre, como reemplazo del mineral de hierro utilizado habitualmente, producto de alto contenido de Óxido de Hierro, superior al 59%, presente como Fayalita (Fe_2SiO_4) y Magnetita (Fe_3O_4).

[52] GOMÁ F. 1979. El Cemento Portland y otros aglomerantes. Barcelona, Editores Técnicos Asociados. 155 páginas.-

[53] ALP, I.; H. DEVECI; H. SÜNGÜN. 2008. Utilization of flotation wastes of copperslag as raw material in cement production. Revista Journal of Hazardous Materials. (159): 390-395.-

En el siguiente, se aprecia que a temprana edad, el cemento con escoria de cobre, confiere una menor resistencia, resultados que a los 28 días se invierten, desprendiéndose que la escoria de cobre, confiere un efecto retardante en el proceso.

Figura 4-2. Resultados comparados de morteros fabricados con cemento Portland con y sin Escoria de Cobre.

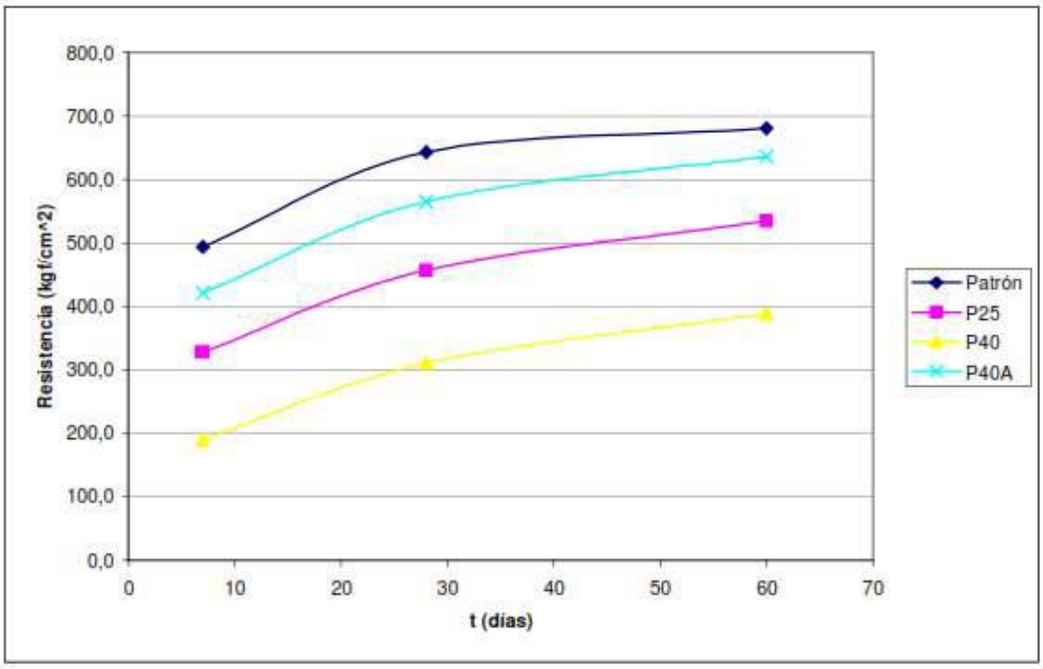


Fuente: Alp et al (2008).

Orizola (2006)[54], ha utilizado Escoria de Cobre de la fundición Caletones de CODELCO, como reemplazo parcial del cemento Portland. Para ello, llevo a cabo molienda de Escoria de Cobre, hasta similar la finura del cemento Portland corriente (4400 gr/cm2). Una vez obtenido el material, realizó probetas de mortero normal, reemplazando el cemento Portland por la Escoria de Cobre finalmente molida, en porcentajes de peso, en un 25% y 40 %, las que fueron comparadas con una muestra patrón, confeccionada con 100% de cemento Portland. La resistencia de compresión mostrada en la figura siguiente, ha sido menor en ambos casos de reemplazo respecto de la muestra patrón, en un 29% y 43% para reemplazo de 25% y 40% respectivamente. Sin embargo, estos resultados han cumplido con los requisitos mínimos establecidos en la normativa nacional vigente.

[54] ORIZOLA, S. Uso de escoria de cobre en cementos". Tesis Ingeniería Civil. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago- 2006, 84 págs.

Figura 4.3: Desarrollo de la resistencia en función del tiempo.



Fuente Orizola *(2006).*

Existen otras investigaciones para evaluar el uso de la escoria de cobre, como son los casos de Almeida *et al* (2007), Rojas (2004)[55], quien utilizó escoria de Cobre proveniente de Fundición Hernán Videla Lira, y realizó pruebas de compresión, adicionando escoria de cobre en porcentajes hasta 30% en relación al cemento utilizado para la confección de morteros, en donde los resultados obtenidos, arrojaron una baja en la resistencia a medida que aumentaba la adición de escoria de cobre.

De estos estudios, es interesante saber que al utilizar la escoria de cobre en reemplazo del cemento Portland, se generen propiedades diferentes que las obtenidas por morteros comunes, y además se encuentren contenidas bajo los parámetros mínimos y máximos establecidos en las normativas vigentes, pudiéndose así, buscar aplicaciones en situaciones especiales, donde se desea aumentar los tiempos de fraguado o disminuir la generación de calor en las mezclas.

[55] ROJAS F.. Estudio de prefactibilidad técnica del uso de la escoria de cobre en materiales de construcción. Tesis Ingeniería. Civil Metalúrgico. Univ. de Atacama, Facultad de Ingeniería. Atacama - 2004, 165 p.-

4.4.2. **Escoria de cobre como reemplazo en áridos**

Los áridos ocupan entre un 65 y un 75% de volumen total del hormigón, son materiales pétreos compuestos por partículas duras de forma y tamaño estable, si son retenidas en tamiz de 5 mm, se les llama áridos gruesos y si pasan el tamiz de 5 mm y retenidos en 0,08 mm son áridos finos [56].

4.4.2.1. **Escoria de cobre como reemplazo en áridos finos**

Al utilizar la escoria de cobre como reemplazo de los áridos finos tradicionales, Cendoya (2007), obtuvo resultados esperanzadores en la fabricación de hormigones. Tanto los ensayos de compresión como las pruebas de flexo-tracción, registraron mejores valores al ser comparadas con las probetas testigo, registrándose valores mayores para un 40% de remplazo de las arenas por Escorias de Cobre. Producto que la escoria es más densa que los Áridos Tradicionales, la densidad de las probetas aumento un 6% para un 50% de reemplazo [57].

Al-Jabri. *et al*, (2011)[58], amplió el rango de reemplazo variando de 0 hasta 100% de los áridos finos en la fabricación de mortero y hormigón, todas las probetas de morteros, realizadas con escoria de cobre, arrojaron aumentos en sus resistencias, en tanto, para pruebas de absorción como de volúmenes de los poros permeables, los valores fueron decreciendo hasta la muestra con un remplazo del 40%, para luego aumentar, registrando valores máximos en las probetas donde se reemplazó la totalidad de la arena por escoria disgregadas.

De igual forma, Rojas (2004), varió el reemplazo de la arena por escoria fina hasta un 30% en la fabricación de morteros, obteniendo aumentos en la resistencia a medida que aumentaba el reemplazo.

La escoria de cobre, ya sea granallada o enfriada al aire, al encontrarse en sus lugares de acopio, no cumple con lo dispuesto en la normativa nacional, por lo tanto, debe ser

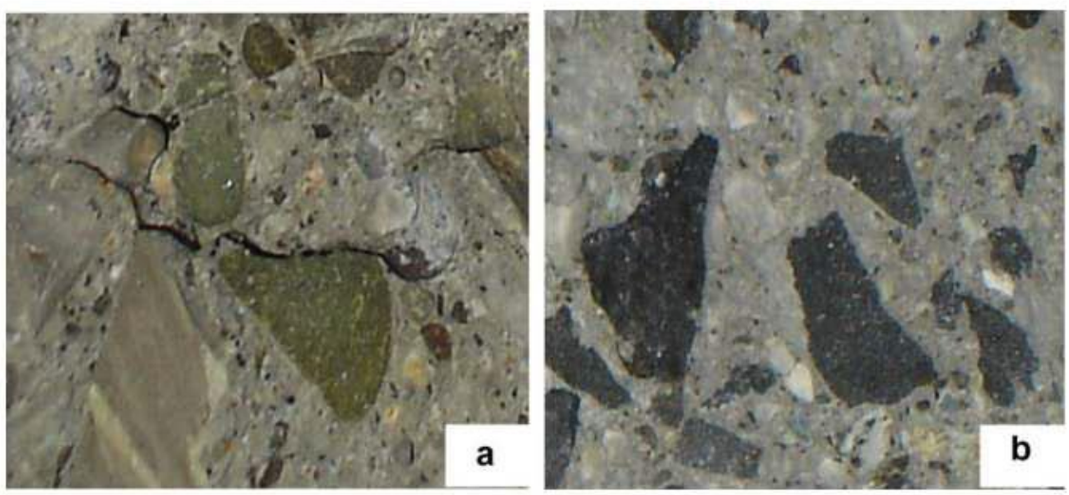
[56] http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/MaterialCursos/Aridos1.pdf, (Consulta 23 Abril 2016).-
[57] CENDOYA, P. 2009. Efecto en la resistencia de las escorias de fundición de cobre como agregado fino en el comportamiento resistente del hormigón. Ingeniare (Chile). 17 (1): 85-94.-
[58] AL-JABRI, K.; A. AL-SAIDY; R. TAHA. 2011. Effect of copperslag as a fine aggregate on the properties of cement mortars and concrete. Construction and Building Materials.(25):. 933-938.-

tratada mediante tamices para lograr una granulometría adecuada, o realizar molienda como lo han hecho la mayoría de los investigadores.[59]

4.4.2.2. Escoria de cobre como reemplazo en áridos gruesos

Khanzadi *et al* (2009)[60], utilizó la escoria de cobre para reemplazar el 100% de los áridos gruesos, en la fabricación de hormigón de alta resistencia, incorporando 6% y 10% Humo de Sílice para lograr tal efecto. Al ser comparados con las muestra patrón confeccionadas con áridos tradicionales, las resistencias a la compresión registraron aumentos en general de un 10% a los 28 días.

Figura 4-4.: Cara de falla de probetas ensayadas a compresión:



(a) Hormigón con agregado grueso tradicional;

(b) Hormigón con escoria de cobre como agregado grueso.

Fuente: Khanzadi et al (2009)

Ventanas Codelco, a raíz de los enormes volúmenes de pasivos medioambientales, que posee sobre todo en lo que respecta a los escoriales de cobre ha decidido como política de la empresa entregar estos pasivos ambientales, al estado de Chile, a través del Ministerio de Obras Públicas. La razón principal, de este acuerdo, es que la escoria de cobre ha dado muy buenos resultados, en estabilización de carreteras y en la compactación de suelos. Esto está avalado, por el laboratorio de la Dirección de Vialidad del MOP de la región de Valparaíso, donde se verificó que este pasivo ambiental, se puede ocupar, en la confección y diseño de la infraestructura vial (terraplenes), capas estructurales granulares (base) y también como material pétreo de hormigones donde la mayor densidad del hormigón, no signifique un impedimento o restricción. Por lo tanto

[59] OYARZÚN Kneer, Iván: ”Influencia de las escorias de cobre en la fabricación de hormigón” Tesis Ingeniería Civil, Universidad Austral de Chile, Valdivia, 2013

[60] KHANZADI, M; A. BEHNOOD. 2009. Mechanical properties of high-strength concrete incorporating copper slag as coarse aggregate. Construction and Building Materials.(23): 2183-2188.-

este pasivo, recibió el visto bueno en la evaluación técnica a la que fue sometido, y que es exigible, para el código de carreteras y caminos, y que por lo tanto se puede utilizar, en proyectos viales.

También se debe considerar, que al utilizar las escorias de cobre para obras viales (camineras), se consigue, una disminución de este pasivo ambiental, y también una importante baja en la extracción de áridos naturales desde ríos, riachuelos, esteros, dunas etc., dado que no se "sacrifica", estas cantidades de recursos naturales.

En otros países como Japón y Estados Unidos, se está empleando este recurso de la pirometalurgia, en la estabilización y compactación de caminos, desde un tiempo a esta parte, con excelentes resultados. En Chile, la escoria de la Fundición Ventanas, ha entregado, este material, con un volumen aproximado de 525.000 metros cúbicos, a proyectos favorecidos, como la ruta F-216, ampliación de la ruta F-30-E que une Puchuncaví y Concón y la ampliación de la ruta F-210, que permite la entrada a Quintero. No esta demás decir, que otras de las virtudes de ocupar este pasivo ambiental, es el ahorro al estado de Chile de aproximadamente de 525 millones de pesos, que es por la cantidad de 2 millones de toneladas que entregó Codelco. [61][61]

4.5. OBTENCIÓN Y RECUPERACIÓN DE METALES VALIOSOS A PARTIR DE LA ESCORIA

Actualmente existen una serie de estudios que buscan reciclar la escoria de diversos procesos, a través, de la recuperación de metales que se encuentran en su composición, y que hasta el momento no son recuperados como es el caso del cobalto, níquel, molibdeno y compuestos de hierro, entre otros, generando una posibilidad económica y de mejoramiento ambiental considerable. Investigaciones realizadas por CONICYT han permitido estudiar la lixiviación de escorias con ácido sulfúrico para la recuperación de cobre (Cu) y molibdeno (Mo). En dichos estudios se observó que la cinética de lixiviación del hierro es equivalente e, incluso superior, a la de Cu y Mo, incluso se planteó que podría estar influyendo en la lixiviación del cobre al oxidarse desde Fe(II) a Fe(III) en la solución. Por lo tanto, debido a la alta concentración de hierro en la escoria, es inevitable su lixiviación junto con el cobre y el molibdeno. De acuerdo a estos

[61] http://codexverde.cl/aprueban-uso-de-escoria-de-la-fundicion-ventanas-como-arido-alternativo-en-caminos/

primeros resultados, sobre el 98% del consumo de ácido, está asociado a la disolución del hierro para una escoria con 0,8% de Cu y 0,3% de Mo. (CONYCYT, 2005)[62]

4.6.- ELECCIÓN DEL USO MÁS ADECUADO PARA LA UTILIZACIÓN DE LAS ESCORIAS DE COBRE DE LA FUNDICIÓN Y REFINERÍA DE VENTANAS

De todas las opciones que se encuentran para eliminar o disminuir las escorias de cobre en el entorno de la Fundición y Refinería de Ventanas, de las anteriormente analizadas ; se piensa que por los costos, los volúmenes a utilizar y el impacto inmediato en el medio ambiente, la mejor opción es la utilización de las escorias de cobre de la Fundición y Refinería, es su uso como árido grueso, en la construcción y reparación de caminos en el entorno inmediato de la planta, como en las vías que conducen hacia ella, tanto a nivel comunal como provincial.

[62] SEPÚLVEDA Estay, Consuelo Alejandra: "Utilización de escorias de fundición para la producción de compuestos de hierro", Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Químico, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología, 2006

CONCLUSIONES

Y

RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES: Y RECOMENDACIONES

La escoria de cobre se encuentra presente en los sectores aledaños a las actividades mineras, provocando un impacto indeseado para el medio ambiente y la comunidad. Este problema, por el desarrollo que ha experimentado la industria cuprífera los últimos años se ha acrecentado, producto del aumento del material acumulado.

La escoria se considera un pasivo ambiental y puede permanecer en los lugares de acopio por décadas, es por ello que en los últimos años, hay un creciente interés en buscar alternativas de uso para éstas, ya que su volumen crece anualmente, por cada tonelada de cobre, como se mencionara con anterioridad se generan 2,2 toneladas de escorias pirometalúrgicas a las que es necesario darles uso.

La escoria puede utilizarse en la fabricación de ladrillos refractarios, en la fabricación de lanas minerales como aislantes, hoy en nuestro país se está trabajando en la eficiencia térmica de las viviendas, con la aprobación del Manual de Procedimientos para la Calificación Energética de Viviendas, lo que conlleva al requerimiento en el corto plazo de mayor cantidad de material para la aislación de las viviendas.

Otro uso de la escoria de cobre es su uso como material abrasivo para limpiar superficies metálicas o de hormigón, en las cuales es altamente eficiente. Desde hace un tiempo se han puesto de moda las envolturas de edificios, mediante building wrap, con lo cual mediante el canje publicitario de las mallas que protegen los andamios, se realiza la limpieza de edificios en el centro de las principales ciudades.

También es recomendable el uso de este residuo industrial en el proceso de fabricación de cementos como sustituto parcial de los minerales de sílice y hematita, contando entre sus beneficios cementos de alta resistencia y con disminución de los costos de producción y del consumo calorífico, como también del menor consumo de agua lo que ayuda a la sostenibilidad del medio, lo que se sumado el factor de consumir

A nivel nacional, se han realizado algunos estudios en las universidades, para la incorporación de la escoria de cobre especialmente en la fabricación del hormigón, encontrándose propiedades favorables al compararse con hormigones de áridos tradicionales, como son el aumento de la densidad, lo que ayuda a mejorar el comportamiento de elementos estructurales, donde el peso propio cumple un rol importante en los diseños, ya que los hormigones con escoria de cobre, presentan una

resistencia y una densidad mayor que los hormigones convencionales debido a la alta densidad de la escoria de cobre.

Por ello se cree que es necesario, buscar todas las alternativas posibles de reutilización de las escorias, ya que con ello se mejora el ecosistema en el entorno de las fundiciones, al disminuir el material acumulado, además al reutilizarla en el área de las obras civiles, se reduciría la extracción de material pétreo, utilizado como árido en la fabricación de hormigones, lo que además genera un impacto negativo en el medio ambiente. Los proyectos desarrollados con hormigón de escoria, considerando el menor valor que poseen respecto de los áridos tradicionales, traen consigo ventajas económicas.

Creo que es necesario señalar que podemos hacer uso de la escoria directamente como árido grueso, ya sea como balasto o base granular en la construcción de nuevas líneas férreas o en caminos y terraplenes, desgraciadamente Chile contó en el pasado con una extensa red ferroviaria, tanto nacional como internacional, la que en la década de los años 1970 se desmanteló, favoreciendo el transporte por carreteras y en buses, hoy por los atochamientos, la contaminación y el precio de los combustibles, nos damos cuenta de la perdida de nuestra antigua conexión ferroviaria.

En el entorno de la Fundición de Ventanas se han realizado recarpeteo de las carreteras adyacentes, utilizando como árido grueso alternativo la escoria de cobre, con la autorización de la Dirección de Vialidad del MOP Va Región.

Entre las ventajas e su uso se destacan:

- Valorización de un residuo/eliminación acopios
- Mejora de algunos de los parámetros de las mezclas asfálticas como la resistencia al rozamiento.
- Reducción de costes económicos en mezclas asfálticas
- Reducción Impacto ambiental por no extracción en canteras

El necesario continuar desarrollando estudios, para abrir más campos de uso de nuevas aplicaciones.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILAR Elguézabal, A., GARCÍA Medina, I.E. y ORRANTI Borunda, A. "Uso de la escoria de cobre en el proceso de fabricación de clinker para cemento Portland" Revista Materiales de Construcción, N° 281 España 2006
2. AGUILAR, C., NAZER, A., PAVEZ, O.y ROJAS, F.: "Una revisión de los usos de las escorias de cobre", IBEROMET XI, X CONAMET/SAM 2 al 5 de noviembre de 2010, Viña del Mar, CHILE
3. AL-JABRI, K., BAAWAIN, M., TAHA, R., AL-KAMYANI, Z. S., AL-SHAMSI, K., ISHTIEH, A. (2013). Potential use of FCC spent catalyst as partial replacement of cement or sand in cement mortars. Construction and Building Materials, 39(0), 77-81.
4. AL-JABRI, K.; A. AL-SAIDY; R. TAHA. 2011. Effect of copperslag as a fine aggregate on the properties of cement mortars and concrete. Construction and Building Materials. (25):. 933-938.-
5. ALP, I.; H. DEVECI; H. SÜNGÜN. 2008. Utilization of flotation wastes of copper slag as raw material in cement production. Revista Journal of Hazardous Materials. (159): 390-395.-
6. ANGIOLANI, Argeo, "Química Industrial, fundamentos químicos y tecnológicos", Editorial Andrés Bello, Santiago de Chile, 1960, página 369.
7. ARIAS, Vladimir, CORONADO Falcón Rosa, LOVERA Dávila Daniel F., "La valoración de las escorias metalúrgicas como recursos industriales", Revista del Instituto de Investigación FIGMMG, Vol 7, N.° 13, 26-30 (2004) Universidad Nacional Mayor de San Marcos ISSN: 1561-0888 (impreso) / 1628-8097 (electrónico) (Consulta 12 agosto 2016).-
8. BASTOS, A.M., CACHIM, P. & RESENDE, C, P. "Copper Slag Mortar Properties," Materials Science Forum, vol. 587-588, 2008, pp. 862-866.
9. BEHNOOD, A., MEYER, C. & SHI, C., "Utilization of copper slag in cement and concrete," Resources, Conservation and Recycling, vol. 52, 2008, pp. 1115-1120
10. CARDENLEY, René y MONDSCHEIN, Susana: "Control de la contaminación atmosférica de las fundiciones estatales de cobre mediante un sistema de apoyo de decisiones". Revista Ingeniería de Sistemas, Dpto de Ingeniería Industrial, Universidad de Chile, Santiago, Vol. XIV N° 1 Junio 2000, páginas 79-102
11. CENDOYA, P. 2009. Efecto en la resistencia de las escorias de fundición de cobre como agregado fino en el comportamiento resistente del hormigón. Ingeniare (Chile). 17 (1): 85-94.-
12. FREDES, Juan & GUTIÉRREZ, Edgardo: "Estudio de las Variables de Producción, a través de su Impacto en los Costos Indirectos de Fabricación, en los Macro

Procesos de Fundición y Refinería de la División Ventanas de CODELCO Chile, en el período Enero 2003 – Noviembre 2005" Memoria para optar al título de Ingeniero Comercial P.U.C.V. año 2006

13. GOMÁ F. 1979. El Cemento Portland y otros aglomerantes. Barcelona, Editores Técnicos Asociados. 155 p.-

14. GORAI, B., JANA, R.K., & PREMCHAND, "Characteristics and utilization of copper slag--a review," Resources, Conservation and Recycling, vol. 39, 2003, pp. 299-313.

15. KHANZADI, M; A. BEHNOOD. 2009. Mechanical properties of high-strength concrete incorporating copper slag as coarse aggregate. Construction and Building Materials.(23): 2183-2188.-

16. NAZER, A "et al": "Uso de las escorias de cobre en la fabricación de adocretos de hormigón por Revista de la Facultad de Ingeniería, Instituto Tecnológico, Universidad de Atacama, Copiapo, (2013), pág. 23-31.

17. ORIZOLA, S. Uso de escoria de cobre en cementos". Tesis Ingeniería Civil. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago- 2006, 84 pags.

18. OYARZÚN Kneer, Iván Alejandro. "Influencia de las escorias de cobre en la fabricación de hormigón" Tesis para optar al título de Ingeniero Civil en Obras Civiles Universidad Austral de Chile, Valdivia, 2013

19. REYES, Pedro; SÁNCHEZ, Mario y VALENZUELA Armando: "Opciones para el manejo y comercialización de escorias de cobre". Primer workshop de Reciclaje y Recuperación de metales y materiales, Santiago, Abril 2010.

20. ROJAS Barrera, Gabriel: "Historia Ambiental de la generación termoeléctrica en Ventanas: La producción ecológica de la compensación económica". Tesis de grado: Magister en Geografía, mención Recursos Territoriales, Universidad de Chile. Año 2015.

21. ROJAS F. Estudio de prefactibilidad técnica del uso de la escoria de cobre en materiales de construcción. Tesis Ingeniería. Civil Metalúrgico. Univ. de Atacama, Facultad de Ingeniería. Atacama - 2004, 165 p.-

22. SEPÚLVEDA Estay, Consuelo Alejandra: "Utilización de escorias de fundición para la producción de compuestos de hierro", Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Químico, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología, 2006

23. SPRY, N., "Blocks in Gloucestershire - A survey.," Industrial Archaeology, 2003, pp. 36 - 58.

24. SUAREZ, Aedil. 2009. Mirada Macroeconómica al cobre. Universidad Técnica Metropolitana. (Disponible en: http://cobreutem.wordpress.com/category/1-introduccion/. (Consulta 6 Julio 2016).-