

UNIVERSIDAD CATOLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION
Facultad de Ingeniería Civil



**“Caracterización de la escoria blanca proveniente de la siderurgia integral”
Andrés Alejandro Caballero Garrido**

INFORME DE PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

Profesor Guía:

José Miguel Montenegro Cooper

Profesor Informante:

Roberto Andrés Ponce Abarca

Concepción, Marzo de 2017.

Resumen

El año 2015 se manufacturaron 773 mil toneladas de acero en Chile, según memoria anual CAP (2015), fabricadas mediante siderurgia integral. Para la fabricación de una tonelada de acero, empleando la técnica citada, se generan las siguientes escorias: horno alto (200-250 kg), convertidor al oxígeno (80-120 kg) y escoria blanca (30 kg). La presente investigación caracteriza la escoria blanca proveniente de importante empresa siderúrgica ubicada en Concepción, Chile.

En el horno cuchara se realiza el afino de la colada, lo que tiene como objetivo ajustar las propiedades del acero, para esta muestra se realizaron los ensayos geotécnicos en el laboratorio de geotecnia de la Universidad Católica de la Santísima Concepción que se definen como: i) caracterización del material ii) propiedades de compactación iii) estabilidad volumétrica y iv) propiedades resistentes y de deformación.

Durante la investigación se determinan sus propiedades químico-minerales y medioambientales, con el fin de verificar sus compuestos químicos y minerales, el ensayo medioambiental permite establecer que la escoria blanca no contiene sustancias que puedan presentar un peligro para el entorno donde podría aplicarse, esto permite establecer líneas de investigación para encontrar un uso y valorizarlo como material de agregado en el campo de la construcción e ingeniería civil. Finalmente se recomienda utilizar este material ya que no presenta ningún tipo de propiedad geotécnica y/o medioambiental desfavorable, con respecto a la estabilidad volumétrica, sus partículas de magnesio y cal se hidratan pero no producen un hinchamiento desfavorable, es por esto que se recomienda realizar un estudio a su comportamiento con mezclas de suelos.

Abstract

Chile manufactured 773 thousand ton of steel by integrated steel mill, according to CAP (2015). The fabrication of one ton of this material generates: 200-250 kg of blast furnace slag (named BFS), 80-120 kg of basic oxygen furnace slag (named BOF) and 20-30 kg of ladle furnace slag (named LFS). The present investigation characterizes the latter one that is manufactured on a steel company located in Concepción, Chile.

In the ladle furnace the melting steel is adjusted to confer the properties of the steel. The sample of this slag was analyzed in the Geotechnical Laboratory of the UCSC. The tests performed in this research to this byproduct were the follows: i) material characterization ii) compaction properties iii) volume stability, and iv) shear resistant and deformation properties.

Chemical, mineralogical and environmental properties were determined, in order to verify the chemical compounds and minerals in the slag. The result of the toxicity characteristic leaching test (TCLP) show metals concentration below the limits of indicated on the Decreto Supremo N° 148. Finally, this investigation concludes that this material could be recycled in any construction or civil engineering project, specially mixing with soils.

Agradecimientos

Agradezco profundamente el apoyo de mis padres Margarita y Gerardo quienes siempre han apoyado mis decisiones y respaldado frente a metas que me he propuesto. Mayory y Gerardo, mis hermanos, quienes siempre han estado en mi vida junto a mis sobrinos Catalina, Constanza, Antonia (mi bebé), Gerardo Emiliano (mono mono), Florencia, Alicia y Jorgito, mis cuñados Eliana y Dante. A Gloria, mi polola, que me ayudó a revisar y mejorar la redacción de la tesis, que sin duda me apoya en todo y esta siempre al lado mío para aconsejarme, a mi familia; abuela, tíos y primos, a mis amigos del colegio, de la universidad y de la vida.

Quiero agradecer también a mi profesor guía José Miguel por aclarar mis dudas y ser un apoyo fundamental para desarrollar la tesis, a mi profesor informante Roberto que también ha sido una gran persona. A la universidad por aceptar el proyecto DIN 20/2016 que apoyó económicamente la compra de moldes y materiales que se utilizaron para desarrollar esta investigación.

Gracias a todos!!!

CONTENIDO

Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivo general	2
1.3 Objetivos específicos	2
1.4 Justificación del proyecto	2
1.5 Alcance.....	4
Capítulo 2: Marco Teórico	5
2.1. Introducción.....	5
2.2. Proceso de manufactura del acero	5
2.3. Producción nacional de acero	11
2.4. Propiedades de las escorias	12
2.4.1 Composición química y mineral de las escorias.....	13
2.4.2 Composición química de la escoria blanca (LFS)	17
2.4.3 Composición mineralógica de la escoria blanca	22
2.4.4 Propiedades geotécnicas de la escoria blanca	25
2.5. Uso en la ingeniería	26
Capítulo 3: Metodología	31
3.1. Caracterización geotécnica	32
3.1.1. Caracterización del material	32
3.1.2. Propiedades de compactación	35
3.1.3. Estabilidad volumétrica.....	37
3.1.4. Propiedades resistentes y de deformación	41
3.2. Caracterización químico-mineral.....	44
3.3. Ensayos medioambientales	47
Capítulo 4: Resultados	49
4.1. Presentación y análisis de resultados geotécnicos.....	49
4.1.1. Caracterización del material	49
4.1.2. Propiedades de compactación	51
4.1.3. Estabilidad volumétrica.....	52
4.1.4. Propiedades resistentes y de deformación	57
4.2. Presentación y análisis de resultados químicos.....	63
4.3. Presentación y análisis de resultados Mineralógicos.....	64
4.4. Presentación y análisis de resultados Medioambientales.....	68
Capítulo 5: Conclusiones	69
Capítulo 6: Bibliografía	71
Capítulo 7: Anexo	75
I. ANEXO. “Ensayos Geotécnicos”	75
II. ANEXO. “Ensayos mineralógicos y medioambientales”	98

Lista de figuras

Figura 1. Esquema de un horno alto, empleado en la obtención de arrabio. Fuente: Reporte CAP,2012.....	6
Figura 2. Esquema del horno de convertidor al oxígeno. Fuente: Shi ,2004.....	8
Figura 3. Esquema de un horno de arco eléctrico. Fuente: Montenegro, 2012. ..	10
Figura 4. Esquema de un horno cuchara utilizado en la metalurgia secundaria. Fuente: Yildirim y Prezzi, 2011.....	11
Figura 5. Producción anual de acero líquido, en miles de toneladas. Fuente: CAP, 2015.....	12
Figura 6. Secado al aire de una muestra de escoria blanca.	33
Figura 7. Determinación de gravedad específica mediante el picnómetro.....	34
Figura 8. Probetas enrasadas para ensayo Proctor modificado.....	36
Figura 9. Recipiente para ensayo de expansión potencial.	39
Figura 10. Equipo Netzsch, utilizado para el ensayo de termogravimetría.	47
Figura 11. Curva granulométrica de la escoria LFS.	50
Figura 12. Resultado del ensayo Proctor modificado.	52
Figura 13. Expansión de la muestra en función del tiempo sumergido.	54
Figura 14. Desmolde del material al finalizar el ensayo de expansión potencial. .	55
Figura 15. Resultado de ensayo de colapso.	56
Figura 16. Resultado de ensayo de consolidación.	58
Figura 17. Curvas de penetración CBR.....	59
Figura 18. Resultado del ensayo de corte directo.	60
Figura 19. Tensión de corte en función de la deformación vertical.	61
Figura 20. Resultado ensayo CBR, obtención de ángulo de fricción interna máximo y crítico	62
Figura 21. Ensayo XRD a escorias sin ensayos.....	64
Figura 22. Ensayo TG/DTG a escorias inalterada, ensayo 1.	66
Figura 23. Ensayo TG/DTG a escorias inalterada, ensayo 2.	66
Figura 24. Ensayo TG/DTG a escorias luego de ensayo de potencial de expansión.	67

Figura Anexos

Figura I-1. Curva de penetración CBR sin corrección.	84
Figura I-2. Temperatura (°C) en función de horas duración ensayo (h)	87
Figura I-3. Procedimiento para calcular C_v (min).	95

Lista de tablas

Tabla 1. Composición química de escorias BOF y EAF (%) (Motz y Geisler, 2001).	14
Tabla 2. Análisis químico de escoria BOF de la industria británica, (Po et al., 2006).....	16
Tabla 3. Composición química de la escoria blanca (Setién et al,2008).	18
Tabla 4. Composición química de escoria blanca (Manso et al., 2005).	19
Tabla 5. Composición química de la escoria blanca (Radenovic et al., 2013).	20
Tabla 6. Rango de contenido de elementos químicos en escoria blanca obtenido de diferentes autores,en porcentaje.....	29
Tabla 7. Reactividad hidráulica, basicidad, y composición mineral de las escorias (Tang, 1973).	22
Tabla 8 . Composición mineralógica de una escoria de horno cuchara (Manso et al., 2005).....	24
Tabla 9. Composición mineralógica de la escoria de horno cuchara (Setién et al. 2008).....	25
Tabla 10. Mezclas de escorias EAF y LFS con cemento (Manso et al., 2005).	29
Tabla 11. Propiedades de mezcla escoria con cemento (Manso et al., 2005).	30
Tabla 12. Relaciones entre densidad seca, grado y potencial de colapso.	40
Tabla 13. Clasificación del colapso, según Jennings y Knight (1975).....	41
Tabla 14. Clasificación y uso del suelo según el valor de CBR, según Assis A. (1998).	43
Tabla 15. Concentraciones máximas permisibles, Decreto N°148.....	48
Tabla 16. Valor de las tensiones producidas en el ensayo de corte.	62
Tabla 17. Contenido promedio de elementos químicos.	63
Tabla 18. Resultado ensayo TCLP.....	68

Tabla Anexos

Tabla I-1. Datos para granulometría.....	76
Tabla I-2. Tabla protocolizada para granulometría.....	76
Tabla I-3. Datos para cálculo densidad mínima.....	77
Tabla I-4. Datos para cálculo densidad máxima.....	77
Tabla I-5. Datos para cálculo densidad máxima para muestra saturada.....	77
Tabla I-6. Datos para cálculo gravedad especifica (GS).....	78
Tabla I-7. Densidad del agua a distinta temperatura.....	79
Tabla I-8. Datos del ensayo Proctor modificado.....	80
Tabla I-9. Datos obtenidos para cada probeta.....	80
Tabla I-10. Parámetros de ensayo Proctor modificado.....	80
Tabla I-11. Datos de Confección de la muestras para CBR.....	83
Tabla I-12. Datos después de sumergir las muestras.....	84
Tabla I-13. Tensión en el pistón a penetración de 0,1” y 0,2”.....	84
Tabla I-14. Valores de CBR (%) para 0,1” y 0,2” de penetración.....	85
Tabla I-15. Relación entre la Densidad seca y CBR (%).....	85
Tabla I-16. Energía de compactación para ensayo de expansión volumétrica.....	86
Tabla I-17. Datos de la muestra antes y después de inmersión.....	87
Tabla I-18. Datos de la muestra antes de ensayo.....	93
Tabla I-19. Datos al final de ensayo.....	93
Tabla I-20. Calculo de variables en ensayo de consolidación.....	94
Tabla I-21. Valor de intersección de rectas.....	95
Tabla I-22. Variables para calculo de Coeficiente de consolidación.....	96
Tabla I-23. Valores de preparación de la muestra, calculo de humedad de preparación y calculo de humedad final del ensayo.....	97

Capítulo 1: Introducción

1.1 Introducción

Las escorias de acero tienen una larga historia de uso como sub producto industrial. El inicio de la producción de acero se remonta en los años 2000 A.C., en estos periodos se desconocían las políticas de reutilización de desechos, por lo que eran vertidas como basura. Solo hace un par de décadas atrás, se ha podido determinar el campo de aplicación de este material, para darle un uso y que sea aprovechado de manera óptima.

Los primeros reportes de usos de escoria de acero, son relacionados al físico griego Aristóteles (350 A.C.), quien determinó que podía ser utilizada para fines médicos; como por ejemplo: la curación de heridas. En los siguientes siglos el citado material se empleó con distintos propósitos incluyendo: i) fabricación de bolas de cañón en Alemania (1589) ii) material de construcción para muelles costeros en Inglaterra (1652) iii) material para pavimentos y rellenos en rutas de Inglaterra (1813).

La reacción hidráulica de la escoria de alto horno fue descubierta por el científico alemán Emil Langen (1862), es aquí donde comienza una nueva era en el uso de este subproducto. Las aplicaciones que se realizaron en ese entonces, fueron esporádicas debido a su escasa abundancia.

La industria del acero aumentó considerablemente su producción en el siglo XX, lo que trajo como consecuencia la generación de grandes cantidades de escorias, siendo necesario buscar diferentes áreas donde se podía reutilizar este material. El promover la conciencia de reutilización de desechos y el desarrollo sustentable

permite que se realicen investigaciones que determinen las propiedades de este material, para darle un uso correcto y no generar un problema medioambiental. Actualmente, la industria acerera tiene como deber estudiar la composición química de la escoria que produce, para así acreditar que el subproducto cumple con los requerimientos y estándares para la protección del ambiente en Europa (Historia, www.euroslag.com).

1.2 Objetivo general

Caracterizar la escoria blanca proveniente de una empresa nacional que utiliza la siderurgia integral.

1.3 Objetivos específicos

- Caracterizar geotécnicamente la escoria blanca de siderurgia integral con la finalidad de poder entregar información que sea útil para investigaciones futuras, para motivar el uso de este material y avanzar en temas de reutilización de desechos de la industria siderúrgica.
- Estudiar la composición química, mineral y medioambiental de este material.

1.4 Justificación del proyecto

El crecimiento económico de un país se refleja en la producción de la industria siderúrgica. La generación de escoria blanca se produce en grandes cantidades en la región del Biobío, es decir, miles de toneladas de este material se producen año a año en nuestra región.

A lo largo de la historia de la industria metalúrgica, los países europeos han sido los pioneros en materias de reciclaje y políticas de reutilización de desechos industriales desde el siglo XIX, con el objetivo de mantener libre de contaminación el medioambiente y proteger los recursos naturales que son cada vez más escasos.

Una frase que se ha podido encontrar en la mayoría de los estudios e investigaciones sobre este tema, indica que “la reutilización de materiales que son considerados desechos, ayudan a cuidar y mantener recursos naturales”, Motz y Geisler (2001).

Los crecientes problemas que aquejan a la compañía productora de acero en la región del Biobío, se deben principalmente por la competencia económica que han tenido que enfrentar a causa de la importación del acero desde países asiáticos, y por la cantidad de residuos sólidos que genera a lo largo de su producción. El último punto se ha convertido en un problema que aumenta con los años, ya que la compañía ha tenido que invertir tanto, en transporte, sitios de almacenamiento y deposición final de este subproducto. La totalidad de los residuos generados en el alto horno son vendidos como materia prima a la cementeras locales, las cuales utilizan este producto para mejorar la resistencia y durabilidad del cemento. Sobre la escoria generada en el convertidor al oxígeno se sabe que ha sido utilizada en países asiáticos para estabilizar cierto tipo de terrenos, y que la composición química se asemeja bastante a la de la escoria blanca.

Con lo que respecta a la escoria blanca generada por el horno cuchara, se conoce sobre su utilización como agregado para distintas actividades en ingeniería civil y construcción en Europa, es por esto que surge el interés de analizar este material.

Las propiedades que poseen las escorias blancas están determinadas por: las materias primas que se ocupan al momento de fabricar el acero, el proceso empleado, tipo de acero que se quiere obtener y velocidad de enfriamiento de la escoria.

1.5 Alcance

Esta investigación pretende caracterizar un subproducto proveniente de la producción de acero de una siderurgia integral de la región del Biobío, extraído desde el horno cuchara. Para esto se tomaron muestras representativas de aproximadamente 200 kilos de material obtenido al final del proceso de afino de colada.

Las propiedades geotécnica, química-mineralógica, y ambiental serán determinadas en este estudio.

Los ensayos geotécnicos serán desarrollados en el laboratorio de geotecnia de la Universidad Católica de la Santísima Concepción. Los ensayos químicos serán realizados en el laboratorio de química y control de calidad de la empresa CAP S.A.. Los análisis mineralógicos comprenderán el ensayo termogravimétrico y difracción de rayos x, los cuales serán estudiados en el laboratorio de química de la Universidad de Concepción e instituto GEA de la misma casa de estudio, respectivamente. Finalmente el ensayo medioambiental se realizara por el laboratorio Bureau Veritas (CESMEC).

Capítulo 2: Marco Teórico

2.1. Introducción

La industria del acero se encuentra directamente relacionada con los ciclos de crecimiento y retroceso de la economía de una región o país. Esto se debe a que este material está involucrado en la mayoría de las fases constructivas de diferentes industrias, así mismo sus derivados son usados como insumos en ingeniería civil, construcción, ingeniería mecánica, transporte e industria metalúrgica.

El acero se obtiene empleando principalmente dos materias primas, las cuales dependen del proceso de manufactura: i) arrabio, utilizado en la siderurgia integral y ii) chatarra, utilizado en la siderurgia eléctrica. Las propiedades de la escoria que se generan, dependen esencialmente de: materias primas, proceso de fabricación y tipo de acero que se produce.

A continuación se profundizará sobre el proceso de fabricación del acero.

2.2. Proceso de manufactura del acero

La fabricación del acero puede efectuarse mediante dos procedimientos: i) siderurgia integral y ii) siderurgia eléctrica. Es importante considerar las diferencias entre ellas como por ejemplo: la materia prima que se ocupa y el proceso de manufactura que se realiza.

La siderurgia integral se basa principalmente en la utilización de tres hornos: i) alto horno (ver Figura 1) ii) convertidor al oxígeno (ver Figura 2) y iii) cuchara (ver Figura 4).

La siderurgia eléctrica, en cambio, sólo emplea dos hornos: i) eléctrico (ver Figura 3) y ii) cuchara (ver Figura 4). Este procedimiento será explicado con mayor profundidad en los párrafos siguientes.



Figura 1. Esquema de un horno alto, empleado en la obtención de arrabio.

Fuente: Reporte CAP,2012.

Es necesario comentar que en ambos procedimientos, se emplea el horno cuchara, siendo el subproducto generado en esta fase del proceso la que se pretende caracterizar en esta investigación.

Siderurgia integral

El proceso de fabricación del acero mediante la siderúrgica integral, se realiza a partir de: mineral de hierro, arrabio líquido y sólido, utilizados como materia prima, mientras que el carbón coque, caliza, dolomita y cal son empleados como fundentes. Los materiales van descendiendo por el horno, a medida que se incrementa su temperatura hasta alcanzar los 1.800 °C. El proceso consiste principalmente en la separación del hierro (Fe) con el oxígeno (O), para producir una aleación (compuesto de dos o más elementos químicos), donde al menos uno debe ser un metal hierro (Fe) o carbono (C), llamándole a este último material arrabio. Finalmente se produce la desulfuración del arrabio, el que se utilizará en el horno de convertidor al oxígeno.

La escoria que se genera en este proceso se denomina “Blast Furnace Slag” (BFS) o también conocida como escoria de alto horno, formándose entre 200 a 250 kg de ésta por cada tonelada de acero manufacturado (Euroslag, 2012).

En el horno de convertidor al oxígeno se cargan: arrabio (principal materia prima para la fabricación de acero por este método), chatarra (entre un 10 y un 20 % en peso del total) y fundentes (usualmente cal y dolomita) (Yildirim y Prezzi, 2011). Una lanza se inserta en el convertidor e inyecta oxígeno a altas presiones (Figura 2), proceso que elimina impurezas principalmente el monóxido de carbono (CO), silicio (Si), manganeso (Mn) y fósforo (P). Finalizada esta etapa, se puede indicar que la colada se ha transformado en acero líquido, el cual no puede considerarse totalmente acabado, por lo que necesita completar un par de operaciones de afino adicionales, debido a que el convertidor al oxígeno se centró en la descarburación y desfosforación del material fundido.

La escoria generada en este horno se llama “Basic Oxygen Furnace Slag” (escoria BOF o BOS) , en Chile le llaman escoria Conox, generándose unos 80 a 120 kg por cada tonelada de acero que se fabrica (Euroslag, 2012).

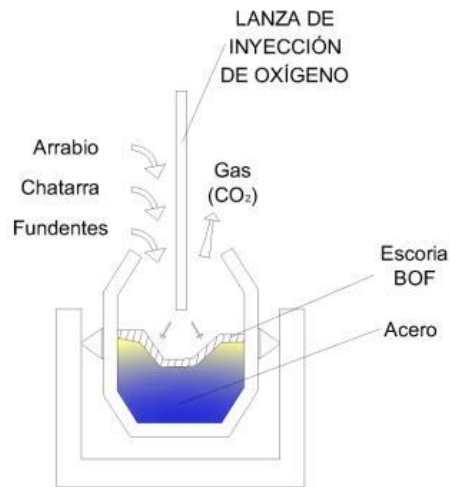


Figura 2. Esquema del horno de convertidor al oxígeno.

Fuente: Shi ,2004.

En el horno cuchara se realiza el afino de la colada de acero. Es decir, la colada se introduce al horno, siendo la finalidad de esta etapa ajustar la composición química del acero que se requiere fabricar. Por ejemplo, la composición química de un acero inoxidable es diferente a la de un acero común o a la de uno de alta resistencia. El ajuste de la composición química se realiza en esta fase.

El subproducto generado en esta etapa es la “Ladle Furnace Slag” (LFS) o también conocida como: escoria blanca, escoria de metalurgia secundaria o escoria de afino. Por cada tonelada de acero manufacturado se generan entre 20 a 30 kg de este subproducto (Manso et al., 2005).

Siderurgia eléctrica

La siderurgia eléctrica consiste en la fusión de chatarras por medio de una corriente eléctrica. Este proceso utiliza diferentes tipos de chatarras, que de no ser recicladas podrían tener un efecto dañino en el ambiente. El horno puede ser cargado con diferentes cantidades y calidades de chatarras de acero, arrabio, o hierro fundido. Los electrodos son los encargados de aumentar la temperatura en el interior. La resistencia del arco eléctrico y del metal permite que se produzca un flujo de carga eléctrica que aumenta la temperatura al interior del horno. A medida que se van fundiendo los metales, el contacto entre estas capas permite que se derrita prácticamente todo el material. Al igual que en el proceso anterior el oxígeno es inyectado para eliminar impurezas que puedan existir. A medida que el proceso ocurre, una piscina de acero líquido se genera en la parte baja del horno. Lima y dolomita son introducidas al horno mientras el material se está derritiendo para apoyar la fundición del proceso.

Luego de que la totalidad de material se ha fundido, se realizan procesos de refinamiento del acero mediante fusión y desfosforación de la mezcla. En el proceso de mejoramiento de la calidad del acero, oxígeno es inyectado dentro del acero fundido mediante una lanza, al igual que en el proceso de la producción en el horno de convertidor al oxígeno. Cierta cantidad de hierro e impurezas son agregadas sobre la colada, incluyendo aluminio (Al), silicio (Si), manganeso (Mn), fósforo (P) y carbón (C), los cuales sufren oxidación en esta etapa (inyección de oxígeno), tal como se ha indicado en el proceso de fabricación de acero por la siderurgia integral. Estos componentes mezclados con cal (CaO) forman la EAFS (siglas en inglés Electric Arc Furnace Slag). Una vez que se obtiene la composición química requerida, el horno es volteado, permitiendo derramar subproducto sobre recipientes. El acero fabricado es enviado a un segundo horno para refinar su calidad y la escoria es llevada a un depósito de tratamiento de escoria.

Como se ha destacado en las publicaciones de USGS, ha aumentado la producción de acero en hornos de arco eléctrico, llegando a cifras del 55% de la producción total en Estados Unidos al año 2006 (Yildirim y Prezzi, 2011, p.3). Finalmente el material se lleva a los hornos de refinación, horno cuchara y al igual que el proceso de la industria integral de donde se obtiene la escoria LFS.

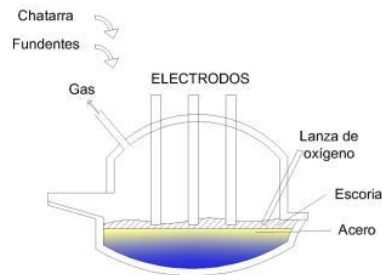


Figura 3. Esquema de un horno de arco eléctrico.

Fuente: Montenegro, 2012.

Horno cuchara

Los procesos de metalurgia secundaria se han desarrollado para mejorar la calidad de los aceros en producción y disminuir la cantidad de sustancias tóxicas que la industria genera, como el azufre y gases como el hidrógeno y el nitrógeno. El horno cuchara, que luce igual a un horno de arco eléctrico pero más pequeño, tiene 3 electrodos de grafito conectados a un transformador de arco, usado para aumentar la temperatura del acero (Yildirim y Prezzi, 2011). Comúnmente en el fondo del horno se ubica una tubería donde pasa gas argón, el cual se inyecta para dirigir y homogeneizar la colada de acero, adicionando por medio de una lanza agentes desulfurizantes tales como Ca, Mg, CaSi, CaC₂ en donde la concentración de sulfuro en el acero puede ser reducida hasta 0,0002% (Schoenberger, 2001).

La sílice (SiO_2) y la alúmina (Al_2O_3) en exceso son absorbidas por la escoria generada en la etapa de afino. La composición química final del tipo de acero que se quiere fabricar (acero común, acero inoxidable, acero de alta resistencia, etc.) se determinan a través de una tolva de aleación, que se encuentra conectada al horno cuchara.

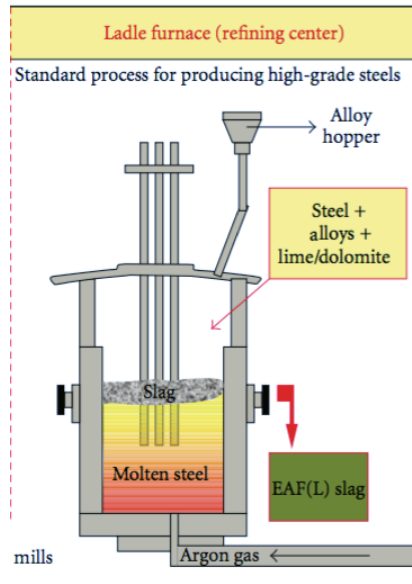


Figura 4. Esquema de un horno cuchara utilizado en la metalurgia secundaria.

Fuente: Yildirim y Prezzi, 2011.

2.3. Producción nacional de acero

La compañía de acero Huachipato es la única empresa que utiliza la siderurgia integral para manufacturar acero en Chile. Según datos entregados por la Compañía de Acero del Pacífico (CAP), en el 2015 la producción de acero terminado alcanzó las 712.841 toneladas, con una producción de acero líquido de 772.853 toneladas, tal como se muestra en la Figura 5. La cantidad de acero indicada anteriormente se efectuó a partir de 712.916 toneladas de arrabio. Es necesario recordar que un 3% de lo producido se convierte en escoria blanca. Por

lo tanto, en el año 2015 se generaron aproximadamente 23.185 toneladas de escoria blanca (LFS), antecedente que motiva el encontrar un uso para este material.

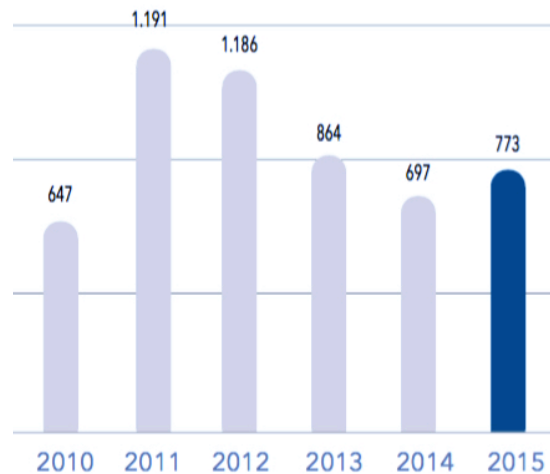


Figura 5. Producción anual de acero líquido, en miles de toneladas.

Fuente: CAP, 2015.

2.4. Propiedades de las escorias

La manufactura de acero, sin importar el procedimiento empleado en su fabricación trae como consecuencia la generación de diferentes tipos de escorias. Los volúmenes de los subproductos generados son en la mayoría de los casos llevados a vertederos para su disposición final.

Actualmente, y debido a la gran cantidad de este subproducto, ha sido necesario invertir en nuevos sitios para almacenar el materiales, situación que genera un costo adicional para las empresas productoras.

La presente investigación propone estudiar las propiedades de la escoria blanca para en un futuro, darle un uso apropiado. Este material puede ser usado como reemplazo de los agregados, siempre y cuando sus propiedades medioambientales lo permitan. Uno de los aspectos a tener en cuenta es la componente geotécnica, entre otras razones debido a que se ha observado una variación volumétrica a lo largo de varios meses, e incluso años, el cual se produce principalmente por la presencia de cal libre y contenido de magnesio libre, materiales que se responsabilizan del aumento volumétrico que genera al entrar en contacto con el agua.

Juckes (2003) indica que es necesario seguir los siguientes pasos para valorizar una escoria: i) Estudiar su reacción a la intemperie (weathering) ii) comprobar su expansión volumétrica mediante una prueba de expansión potencial iii) contrastar los resultados obtenidos en el laboratorio con pruebas in situ.

2.4.1 Composición química y mineral de las escorias

Las escorias BOF y EAF que han sido fabricadas en distintas industrias europeas, tienen como característica principal una similar composición química y mineral junto a sus características geotécnicas. Es de suma importancia estudiar sus propiedades químicas para saber que sustancias están presente a lo largo de la producción del acero. Las diferencias se generan por el uso de dolomita en vez de cal, teniendo como causa altos contenidos de MgO. La Tabla 1 muestra la composición química de las escorias BOF y EAF según Motz y Geisler (2001).

Tabla 1. Composición química de escorias BOF y EAF (%) (Motz y Geisler, 2001).

Escorias	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	P ₂ O ₅	Fe _{Total}	CaO _{Libre}
BOF bajo contenido de MgO	45-55	12-18	< 3	< 3	< 5	< 2	14-20	< 10
BOF alto contenido de MgO	42-50	12-15	< 3	5-8	< 5	< 2	15-20	< 10
EAF bajo contenido de MgO	30-40	12-17	4-7	4-8	< 6	< 1.5	18-28	< 3
EAF alto contenido de MgO	25-35	10-15	4-7	8-15	< 6	< 1.5	20-29	< 3

En general, la composición química de la escoria BOF presenta porcentajes de óxidos de calcio (CaO) y de silicio (SiO₂) entre 42 a 55 % y 12 a 18%, mientras que las escorias EAF abarcan concentraciones de CaO de 25 a 40% y SiO₂ de 12 a 17%, respectivamente (Motz y Geisler, 2001). Cabe señalar que, lo anterior se encuentra relacionado principalmente por el contenido de óxido de magnesio.

La presencia de elevados contenidos de cal y sílice se debe a la adición de cal y dolomita como material fundente. Esta adición provocaría el aumento de magnesio lo que incrementa de un 6 a un 8% la generación de escoria (Juckes, 2003). A pesar de tener un efecto adverso cuando ocurre la desfosforación, algunas mezclas de fundición necesitan aumentar su contenido de caliza o dolomita para el enfriamiento.

El silicio sobre el metal caliente se oxida transformándose en sílice, elemento que ingresa en la capa de escoria y permite ajustar la razón de cal-sílice (Ca/Si). En los casos en el que el contenido de sílice sea reducido (0,2-0,3%), se podría no alcanzar una porción correcta de cal/sílice, lo que tendría como consecuencia un inadecuado proceso de eliminación del fósforo de la colada. En este último caso se requiere aumentar la cantidad de sílice de la colada, lo cual puede ser incrementado la adición de agregados pétreos de origen silicio o escoria de alto horno. Esto puede aumentar el contenido de alúmina, lo que ayuda a fundir los

agregados. Para aplicar un cierto equilibrio en este proceso se adiciona mineral de hierro para enfriar la mezcla aportando óxido de hierro (FeO).

Otro óxido presente en el metal caliente es el fósforo, el cual se oxida convirtiéndose en P_2O_5 , contenido que se concentra en un rango del 1 al 2% (Juckes, 2003). El contenido de carbón de la mezcla se libera como monóxido de carbono (en estado gaseoso). Algunas fábricas reutilizan el gas, para producir energía a partir de éste. Es necesario mencionar que este proceso se necesita aplicar correcta porción de hierro y manganeso, ya que se oxidará y formará parte de la escoria.

Los contenidos de hierro se concentran dentro del 20% (Juckes, 2003). Mientras que la pérdida de hierro reduce la producción de acero. Características del proceso que conduce a una mejora en la desfosforación.

El tipo de escoria que se consigue en cada proceso difiere de la anterior, principalmente debido a la calidad de la materia prima que se utiliza, existiendo por tanto un elevado grado de variabilidad.

Po et al. (2006) presentó la Tabla 2 donde muestra las concentraciones de compuestos químicos de escorias que se obtuvieron en industrias británicas, si se compara con la Tabla 1 se aprecia que las composiciones químicas y sus contenidos son similares.

Los minerales con mayor presencia en las escorias BOF y EAF según Motz y Geisler, 2001. son:

- Silicato dicálcico (dicalciumsilicate, β - C_2S , γ - C_2S).
- Ferrita dicálcica (dicalciumferrita, C_2F).
- Óxido ferroso (FeO).

El silicato dicálcico se estabiliza con el contenido de P_2O_5 . El contenido de cal y MgO libre son los componentes que permiten darle a este material un uso en el área de la ingeniería civil, como antes se ha mencionado, si se controla su estabilidad volumétrica al contacto con el agua, se analiza si estos minerales reaccionan provocándose la hidratación.

Dependiendo de los contenidos de cal y magnesio libre se podrían provocar cambios volumétricos y la pérdida de resistencia en el material.

Tabla 2. Análisis químico de escoria BOF de la industria británica, (Po et al., 2006).

Composición química			
(% w/w)	BOS A ^a	BOS B ^a	BOS C ^a
SiO ₂	15,26	10,78	11,98
Al ₂ O ₃	4,35	1,34	2,82
CaO	41,44	52,19	40,98
MgO	8,06	5,04	7,50
FeO	13,95	17,16	16,09
Fe ₂ O ₃	9,24	10,14	10,06
TiO ₂	0,72	0,55	0,58
P ₂ O ₅	1,15	1,28	0,89
MnO	5,2	2,45	3,78
Na	<0,05	0,07	0,2
K ₂ O	0,42	0,07	1,23
Cal libre	3,93	10,19	5,80

^a información obtenida de análisis químicos de Guardian Laboratorios (Midlands) Ltda., Inglaterra.

La mineralogía de la escoria de acero tiene propiedades similares al Clinker utilizado en la industria cementera, lo que permite suponer que puede tener similares propiedades cementantes. Hipótesis desechada por Juckes (2003) debido a su baja resistencia.

2.4.2 Composición química de la escoria blanca (LFS)

La escoria blanca (LFS) es un subproducto de la industria del acero que viene del proceso de afinado de la colada de acero, después de haber pasado por convertidor al oxígeno (siderurgia integral) o arco eléctrico (siderurgia eléctrica). La composición química de la escoria está definida por cada colada, donde existen varios factores que diferencian a una de la otra. Según Shi (2002); Yildirim y Prezzi (2011) los distintos tipos de escoria blanca comparten características comunes, tales como: presencia de silicato dicálcico (en cualquiera de sus distintos polimorfos), aluminatos cálcicos, cal libre y periclasa. Por otra parte en función del agente desoxidante empleado, será la variará el contenido de los silicatos y/o aluminatos.

Los elementos con mayor abundancia en el material son SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , y MgO (Setién et al., 2008, Yildirim y Prezzi, 2011, y Radenovic et al., 2013). Por otra parte, Setién et al. (2008) determinó que los elementos químicos, en tres escorias diferentes del horno cuchara (LFS) de dos plantas siderúrgicas, se conformaban de altas cantidades de óxido de aluminio denominada en una de ellas (TR-1), mientras que en las otras dos encontró un bajo contenido de óxido de aluminio, S-1 y TR-2 respectivamente, como se muestra en la Tabla 3.

De la Tabla 3 se puede inferir, que los mayores elementos son los silicatos, aluminatos de calcio y de aluminio, sílice, magnesio y óxidos de aluminio teniendo cerca del 95% de la masa total. La basicidad de cada muestra puede indicarnos el grado de reacción hidráulica, en muestras con valores mayores a 1,5 deben ser

estudiadas en profundidad, ya que este antecedente indicaría que son altamente reactivas al entrar en contacto con el agua (Tang, 1973).

Tabla 3. Composición química de la escoria blanca (Setién et al,2008).

Elemento químico	S-1	TR-1	TR-9
CaO	55	57,5	50,5
SiO ₂	15	19,8	12,6
Al ₂ O ₃	12,5	4,3	18,6
MgO	7,5	11,6	11,9
Fe ₂ O ₃	2,1	3,3	1,6
MnO	0,36	0,42	0,52
K ₂ O	0,02	0,015	0,012
Na ₂ O	0,03	0,065	0,055
Cr ₂ O ₃	0,01	0,1	0,01
P ₂ O ₅	<0,001	0,01	<0,001
TiO ₂	0,33	0,18	0,89
S	0,9	1,04	1,5
LOI	5,5	1,2	2,1
C	0,12	0,05	0,04
Ca _l Libre	19	3,5	9,5
MgO Libre	3	10	8
Razón de Basicidad (CaO/Al ₂ O ₃ +SiO ₂)	2	2,4	1,6

En la Tabla 4 se aprecia que los contenidos son muy parecidos a los mencionados anteriormente, esto quiere decir que la diferencia de los materiales analizados en las distintas investigaciones tienden a ser similares químicamente.

Tabla 4. Composición química de escoria blanca (Manso et al., 2005).

Óxido	Valor promedio (%)
CaO	58,0
SiO ₂	17,0
Al ₂ O ₃	12,0
MgO	10,0
SiO ₃	1,0
Σ Otros (TiO ₂ +Na ₂ O+K ₂ O...)	1,5

Según Radenovic et al. (2013) “La escoria blanca no es un desecho industrial peligroso, ya que en su estudio medioambiental (toxicológico) y químico ha demostrado que no contiene elementos que podrían afectar el medio ambiente”.

En la Tabla 5. se presentan los resultados de los ensayos químicos de la investigación realizada por Radenovic et al. (2013), donde los contenidos de compuestos químicos están dentro de los rangos definidos en la Tabla 6.

Tabla 5. Composición química de la escoria blanca (Radenovic et al., 2013).

Compuesto	Valor Promedio (%)
CaO	48,37
SiO ₂	15,00
FeO	1,54
Al ₂ O ₃	14,30
MgO	15,25
Na ₂ O	0,43
K ₂ O	0,36
TiO ₂	0,20
P ₂ O ₅	2,73
Cr ₂ O ₃	0,92

Frente a estos antecedentes podemos entender que la composición química de la escoria blanca varía según los procesos que se le aplique al momento de producir el acero, lo que permite definir un rango de contenido de elementos químicos. Por tanto, se llega a presentar una tabla resumen (Tabla 6), basado en la recopilación obtenida de varios autores.

Tabla 6. Rango de contenido de elementos químicos en escoria blanca obtenido de diferentes autores, en porcentaje.

	Radenovic et al. (2013)	Manso et al. (2005)	Tossavainen et al. (2006)	Setién et al. (2008)	Qian et al. (2002)	Shi (2004)	Nicolae et al. (2007)
CaO	19,02-51,34	58	42,5	50,5-57,5	49,5	30-60	49,6
SiO ₂	11,3-30,1	17	14,2	12,6-19,8	19,59	2-35	14,7
Al ₂ O ₃	8,54-15,18	12	22,9	4,3-18,6	12,3	5-35	25,6
MgO	7,66-18,84	10	12,6	7,5-11,9	7,4	1-10	7,9
FeO	1,17-7,45	-	0,5	-	-	0-15	0,44
Fe ₂ O ₃	-	-	1,1	1,6-3,3	0,9	-	0,22
Fe total	-	-	0,4	-	-	-	0,17
SO ₃	-	1	-	-	-	0,1-1	0,8
MnO	0,22-1,34	--	0,2	0,4,0,5	1,4	0,1-5,0	0,4
TiO ₂	0,08-0,22	1,5	-	0,3-0,9	-	-	-
P ₂ O ₅	1,52-3	--	-	0-0,01	0,4	0,1-0,4	0,2
Free CaO		--	-	3,5-19	2,5	-	-

Tang (1973) publicó la Tabla 7 en la que según la basicidad de la escoria se puede determinar su reacción hidráulica, y junto a esto ver los minerales que se podrían presentar en la escoria en estudio.

Tabla 7. Reactividad hidráulica, basicidad y composición mineral de las escorias (Tang, 1973).

Capacidad hidráulica	Tipo de escoria	Basicidad		Fases minerales
		CaO/SiO ₂	CaO/(SiO ₂ +P ₂ O ₅)	
Bajo	Olivino	0,9-1,5	0,9-1,4	Olivino, fase RO y Merwinita
	Merwinita	1,5-2,7-	1,4-1,6	Merwinita, C ₂ S, y fase RO
Medio	Silicato Dicálcico	-	1,6-2,4	C ₂ S y fase RO
Alta	Silicato Tricálcico	>2,7	>2,4	C ₃ S, C ₂ S, C ₄ AF, C ₂ F, y fase RO

2.4.3 Composición mineralógica de la escoria blanca

La composición mineral de una escoria varía en función de su composición química. Esta variación ocurre, entre otros fenómenos, por la velocidad de enfriamiento que se le aplica al subproducto una vez finalizado el afino de la colada en el horno cuchara. Otras razones que pueden producir esta variación pueden ser: materia prima, tiempo de fundición, combustibles utilizados, entre otros.

Existen diferentes métodos para enfriar la colada de acero, explicados por Shi (2004):

- El enfriamiento por aire a la intemperie (Natural).
- Enfriamiento mediante rocío con agua (Water spray).
- Enfriamiento templado con agua y aire (Water and air quenching).
- Enfriamiento templado por aire (Air quenching).

El enfriamiento por aire en condición natural consiste en dejar el material expuesto al aire, en una zanja o simplemente en el suelo. Se dejan grandes masas de material (mezcla de material granular y polvoriento) expuestos a la intemperie donde ocurren diferentes procesos químicos. El polvo se produce por la conversión de $\beta\text{-C}_2\text{S}$ a $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ a 675°C . Como $\beta\text{-C}_2\text{S}$ a $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ tienen distintas estructuras cristalinas y densidades, esta conversión es acompañada por un aumento de volumen de alrededor del 10%, lo que provoca una destrucción de los cristales generando que su granulometría alcance un tamaño cercano a un polvo (Lea, 1974).

En el proceso de enfriamiento por rocío con agua, la escoria de acero fundido es llevada a un reservorio y se somete a enfriamiento con aire. El agua se rocía sobre la superficie hasta que la escoria se solidifica y como consecuencia de los cambios de temperatura se comienza a partir y va formando trozos de material sólido con tamaños de partículas cercanos a 1 pulgada (Herrero, 2015). De este proceso proviene la conversión $\beta\text{-C}_2\text{S}$ a $\gamma\text{-C}_2\text{S}$, al aplicar agua cuando la escoria tiene aún elevada temperatura (1000°C).

Los siguientes métodos de enfriamiento templado con agua y aire, consisten en aplicar agua o aire a compresión a la masa de escoria, pero en ciertos casos estos producen explosiones que lo convierten en procesos inseguros ya que la aplicación debe ser totalmente controlada. Más detalles de este procedimiento pueden encontrarse en publicaciones de Ye y Liao (1999) y Montgomery y Wang (1991).

Diferentes investigaciones de la escoria de horno cuchara han sido desarrolladas por diferentes autores alrededor del mundo. Manso et al. (2005) desarrolló un estudio a una escoria proveniente de España, donde su composición mineral se presenta en la Tabla 8.

Tabla 8. Composición mineralógica de una escoria de horno cuchara (Manso et al., 2005).

Composición mineral	Cantidad (%)
Espinel ($\text{Al}_2\text{O}_4\text{Mg}$)	20
Piroxeno o Diópsido ($\text{Si}_2\text{O}_6\text{CaMg}$)	5-10
Bregidita (SiO_4Ca_2)	a^a_1
Olivino (SiO_4Ca_2)	a^a_2
Larnita SC_2 - β SiO_4Ca_2	a^a_3
Belita SC_2 - γ $\text{SiO}_4\text{Ca}_2a_4$	a^a_4
Alita SC_3 SiO_5Ca_3	a^a_5
Anhidrita SO_4Ca	3
Periclusa MgO	4-8
Porlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$	18-22
Fase Amorfa	5-10
Brucita $\text{MG}(\text{OH})_2$	No observado

^a $\sum a_i \approx 40\%$

Setién et al. (2008) en su estudio determinó que la escoria LFS es un material no homogéneo, que se presenta en forma de polvo. Debido a su singular composición mineral puede poseer capacidades cementantes al contacto con el agua, además de ser reciclado en proyectos de ingeniería civil. La Tabla 9 muestra los minerales encontrados en la escoria de horno cuchara por el citado autor.

Tabla 9. Composición mineralógica de la escoria de horno cuchara (Setián et al. 2008).

Componente	Fórmula	S-1	TR-1	TR-9	
Dióxido	$\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2$	a_1	b_1	c_1	D
Merwinita	$\text{Ca}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$	a_2	b_2	c_2	Mw
Wollastonita	CaSiO_3	a_3	b_3	c_3	W
Larnita (Bregidita, Ingesonita)	Ca_2SiO_4	a_4	b_4	c_4	L,B,In
Olivina de Calcio	Ca_2SiO_4	a_5	b_5	c_5	O
Espinela	MgAl_2O_4	5	-	-	S
Mayenita	$\text{Ca}_{12}\text{Al}_{12}\text{O}_{33}$	5	7	25	My
Aluminato de Calcio	CaAl_2O_4	3	-	-	AC
Alminato Tricálcico	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	6	2	10	T
Jasmundita	$\text{Ca}_{11}(\text{SiO}_4)_4\text{O}_2\text{S}$	1	3	1	J
Fluorita	CaF_2	2	2	3	F
Óxido de Hierro	Fe_xO_y	2	5	2	I
Portlandita	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	16	5	10	P
Periclasa	MgO	3	10	8	M
Brucita	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	1	-	-	Br
Aluminio	Al	2	-	.	A

$$\Sigma a_i=55\%; \Sigma b_i=65\%; \Sigma c_i=50\%$$

2.4.4 Propiedades geotécnicas de la escoria blanca

Si bien es cierto que la reutilización de la escoria de horno cuchara se realiza desde hace muchos años en Europa, los artículos que estudian este material son

pocos. Los estudios relacionados este material se basan principalmente en mezclas junto a otros materiales.

Según Tossavainen et al. (2007) la velocidad de enfriamiento define varias propiedades geotécnicas del material. Al realizar un enfriamiento rápido se obtiene un material con un elevado grado de amorfismo, el cual es estable volumétricamente, de fácil disgregación y porosidad. Usualmente suele presentar una densidad entre 27,1 y 29,7 kN/m³.

Por otro lado, algunas investigaciones (Papayianni y Anastasiou (2006), Rodriguez et al. (2009), y Manso et al. (2011)) determinan que la densidad de la escoria blanca puede variar entre 25,1 y 25,4 kN/m³.

Manso et al. (2005) y Rodríguez et al. (2009) determinaron valores de la superficie específica, con valores que van desde los 2,7 cm²/gr a los 3,1 cm²/gr, los que al ser comparados con los que posee el cemento Portland, que van de los 3 a 4 cm²/gr, son bastantes cercanos.

Con respecto a la granulometría del material, Manso et al. (2005) y Setién et al. (2008) confirmaron que el tamaño de las partículas se encuentra comprendido entre 0,003 mm y 0,01 mm, las más pequeñas, y entre 0,050 y 0,060 mm, las de mayor tamaño, siendo las más abundantes las partículas menores a 0,0025 mm.

2.5. Uso en la ingeniería

En la actualidad, subproductos provenientes de industrias acereras, se han convertido en una opción de reutilizar un material que probablemente se enviaría a un vertedero para su deposición final. Actualmente varios estudios sobre el uso de

la escoria blanca en mezclas con cemento/concreto, y mezclas de escoria con suelos están siendo desarrollados. En la industria del concreto/cemento la escoria blanca puede ser utilizada como materia prima para producir el cemento Portland (CEDEX, 2013), también ha sido usada como material cementante con catalizadores químicos bajo condiciones de curado (Shi and Hu, 2003; Shi, 2004), este subproducto ha sido probado en pastas de morteros y cemento (Papayianni and Anastasiou 2006; Manso et al. 2005; Rodriguez et al. 2009), utilizado también para construir terraplenes de caminos (Kanagawa and Kuwayama 1997; Celemín et al. 2007; Montenegro and Celemín 2008; Celemín Matachana et al. 2011, Montenegro, 2012) y como fertilizante en actividades de agricultura para quitar la acidez de algunos terrenos (Euroslag, 2012).

El comportamiento de la escoria blanca debe ser analizado, principalmente su estabilidad volumétrica y comportamiento medioambiental, ya que investigaciones han indicado que es un material bastante reactivo al entrar en contacto con agua, y que ha presentado deformaciones (expansión) considerables según Motz y Geiseler (2001), Manso et al. (2005), Montenegro (2012), por nombrar algunos investigadores.

Los principales objetivos de la valorización de la escoria blanca, declarados por la comunidad europea (Motz y Geiseler ,2001) son:

- Proteger el medio ambiente y mejorar su calidad.
- Promover la protección de la vida humana.
- Garantizar una proporción adecuada para aumentar y no perjudicar recursos naturales.

Este último objetivo tiene como interés principal concientizar la responsabilidad de salvar los recursos naturales mediante el uso de este subproducto, incrementando su utilización, cuando sus propiedades técnicas y medioambientales lo permitan.

El FEhS (instituto alemán de investigación de escorias de horno y de acería, Motz y Geiseler ,2001) determina que una escoria fresca (sin envejecer) con bajos contenidos de MgO , y que no haya sido expuesta a la intemperie puede utilizarse como:

- Base o sub base si su contenido de cal libre es mayor al 7%.
- Carpeta asfáltica si su contenido de cal libre es menor al 4%.

Nota: Este criterio se considera dependiendo del contenido de cal hidratada.

Para estudiar en detalle el uso de la escoria blanca se presenta su uso en diferentes tipos de materiales y obras de construcción, por ejemplo en: morteros, caminos pavimentados, mezclas de escoria-cemento y en fabricación de terraplenes.

La presencia de escoria en morteros se debe a su elevado contenido de cal. Esto mejora su trabajabilidad y retención de agua. En mezclas con cemento portland se utiliza para trabajos de mampostería. Además de la similitud entre los óxidos presentes, incluso en lo que refiere a proporciones, entre la escoria blanca y el clinker del cemento Portland, hacen que este subproducto sea ocupado como materia prima para la fabricación de nuevos conglomerantes según Mroueh et al. (2001), Manso et al. (2005), Bosela et al.(2009), Arribas et al. (2010), Kim y Lee (2012), Manso et al. (2013).

La mezcla de escoria y cemento se han realizado para la construcción de rutas con tráfico reducido y cargas livianas, por ejemplo en caminos rurales, donde se han realizado mezclas de escoria de EAF y BOF con cemento portland y agua. (Manso et al, 2005). Dosificaciones y aplicaciones las han presentado Shelburne y DeGroot (1998).

Mezclas con diferentes proporciones de suelo y cemento han sido estudiadas por Manso et al.(2005). Esta investigación se desarrolló con mezclas de escoria BOF y EAF, donde se determinaron las densidades más altas, para luego mezclarlas con cemento y analizar su resistencia. Los autores probaron las dosificaciones que se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Mezclas de escorias EAF y LFS con cemento (Manso et al., 2005).

Muestra	Escoria EAF (%)	Escoria LFS (%)
1	65	35
2	70	30
3	75	25

De los resultados obtenidos las muestras 2 y 3 presentaron las densidades más altas.

Debido a la variación de la fabricación de acero el uso de escorias similares requerirá pruebas para determinar el contenido apropiado para elegir la mejor mezcla.

La Tabla 11 muestra los parámetros geotécnicos de las mezclas, pero además se presentan los valores que se obtuvieron en las mezclas de escoria con cemento, para entender esta tabla la nomenclatura 70-30-2, significa que la mezcla ha fabricado con los siguientes porcentajes, 70% escoria EAF, 30% escoria LFS y 2% de cemento del peso total de mezcla 70-30.

Tabla 11. Propiedades de mezcla escoria con cemento (Manso et al., 2005).

Mezcla	65-35	70-30	75-25	70-30-2	70-30-3	70-30-4
Densidad máxima (g/cm ³)	2,25	2,36	2,38	2,42	2,40	2,37
Humedad óptima	8,6	10,3	9,9	10,9	11,5	12,7
Potencial de expansión ¹ (%)	-	0,14	-	0,17	0,19	0,16
Test compresión ² , 2 días (MPa)	-	0,49	-	0,96	1,19	1,27
Test compresión ² , 7 días (MPa)	-	0,64	-	2,22	2,33	2,41
Test compresión ² , 28 días (MPa)	-	1,01	-	3,89	3,98	4,06
Test compresión ² , 90 días (MPa)	-	1,14	-	4,70	4,35	4,21

¹ ASTM D4792, ²ASTM D1633

De los resultados obtenidos en la Tabla 11 se obtuvo un buen comportamiento de las mezclas, donde la muestra 70-30-2 se consideró la que alcanzó el mejor desempeño.

Los resultados de los ensayos de compresión para 2, 7 y 28 días son muy parecidos. Como era de esperar el aumento del contenido de cemento mejoró la capacidad de resistencia de las muestras. Para la probeta de 90 días se estableció que su resistencia incremento por que tuvo mayor tiempo de curado.. Finalmente, la muestra 70-30-2 fue la que tuvo mejor desempeño, ya que se alcanzaron buenos resultados aplicando pequeña cantidad de cemento, y que de un punto de vista económico es favorable.

Capítulo 3: Metodología

Anteriormente se ha comentado la importancia del tamaño de las partículas en las propiedades de la escoria blanca. El material utilizado en la presente investigación ha sido tamizado por la malla 2,00 mm, con el objetivo de trabajar con un material homogéneo y caracterizar el material fino, el cual desarrolla las propiedades cementantes que se buscan conocer.

El material analizado corresponde a un subproducto de la industria siderúrgica. Sin embargo, en esta investigación se caracterizó asumiendo que éste presenta un comportamiento similar al de un suelo. Es por ello que la normativa empleada en su caracterización geotécnica han sido las que indican las normas ASTM.

La escoria (200 kg aprox.) ha sido almacenada en un contenedor metálico, el cual estaba cerrado completamente para no alterar y contaminar el material a lo largo de su almacenamiento, es importante indicar que el material fue extraído luego de la finalización del proceso de refinamiento del acero en el horno cuchara, no se tenía certeza si fue enfriado rápida o lentamente, duda que se podrá aclarar con los resultados de los ensayos químico-minerales.

Antes de cada ensayo, el material se aireaba hasta que la muestra alcanzara la temperatura y humedad ambiente. Posteriormente, el material se cuarteaba para conseguir una muestra representativa, a continuación se detallan los procedimientos de los ensayos realizados.

3.1. Caracterización geotécnica

Los ensayos que componen esta sección son primordiales para caracterizar el material en estudio, así mismo para poder conocer su comportamiento frente a distintas sollicitaciones y por supuesto a condiciones desfavorables, en contacto con agua o muestras saturadas.

Los ensayos geotécnicos se han agrupado en 4 tipos:

- Caracterización del material.
- Propiedades de compactación.
- Variación volumétrica.
- Propiedades resistentes y de deformación.

3.1.1. Caracterización del material

Una muestra representativa del material fue extraída siguiendo lo indicado en la norma ASTM D 421, una vez disgregada y secada en el horno, se pudo apreciar que es un material bastante fino, tanto así que al momento de moverlo con una poruña gran cantidad de fino queda suspendido en el aire, es por esta razón que para realizar los ensayos se utilizaron guantes, antiparras y mascarilla para evitar la inhalación de partículas finas.

La Figura 6 muestra la escoria blanca durante el proceso de aireado. El recipiente negro contiene el material extraído desde un horno cuchara, sin ningún tratamiento previo, mientras que en el amarillo se almacenaron las muestras ensayadas y/o alteradas, con el fin de mantenerlas en un lugar donde no se espongan al medioambiente ya que no se tiene certeza de que sea un material no contaminante.

Para comenzar con la caracterización se realizó la clasificación granulométrica según indica la norma ASTM D 422, el material se lavó en la malla #200 con el fin de cuantificar el contenido de fino presente en la escoria blanca, y luego se secó al horno por 24 horas a 100° C. Al día siguiente el material se tamizó en las mallas N° 10 (2,00 mm); 20 (0,85 mm); 40 (0,425 mm); 60 (0,25 mm); 200 (0,075 mm), los datos se registraron en tablas protocolizadas (I. Anexo) para así conocer su granulometría.

La plasticidad se estudió tal cual lo indica la norma ASTM 4318. Según los antecedentes recopilados, la escoria blanca no presentaría índices de plasticidad. es necesario mencionar que se requieren miles de años para que se produzca la meteorización química, para que un suelo desarrolle plasticidad.

El material se cribó por el tamiz N°40 (0,4 mm), las muestras se humectaron con agua destilada para formar una pasta y así encontrar el límite líquido, en la cuchara de Casagrande, y el límite plástico, con los bastoncitos de diámetro 1/8" (3 mm).



Figura 6. Secado al aire de una muestra de escoria blanca.

El peso específico de las partículas se determinaron por medio de un picnómetro, se siguió lo indicado en la norma ASTM D 5550.

Se preparó la muestra tal cual lo indica la norma antes mencionada, los picnómetros fueron lavados y secados completamente antes de realizar los ensayos, el agua utilizada para estos procedimientos es agua destilada, se quitaba el aire dentro de la mezcla saturada con una bomba de vacío, donde se dejaba funcionar por 30 minutos. Se registraron los pesos en tablas protocolizadas para finalmente calcular los parámetros buscados (Anexo I).

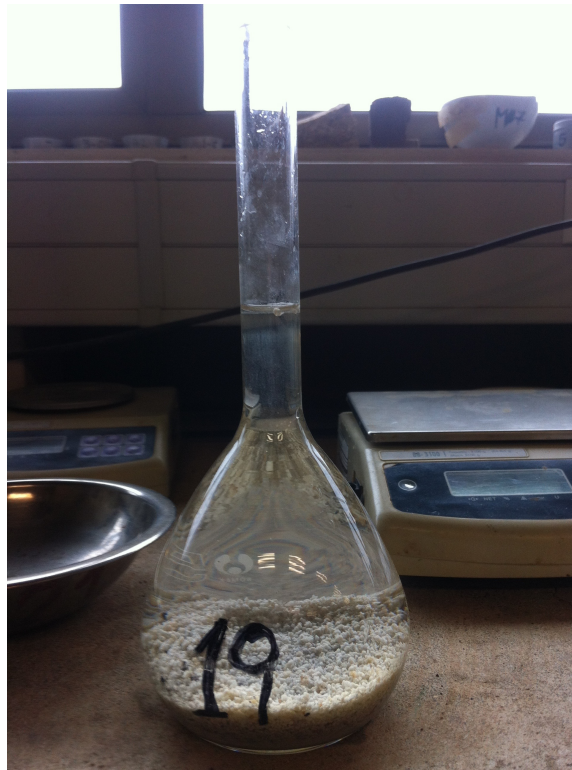


Figura 7. Determinación de gravedad específica mediante el picnómetro

3.1.2. Propiedades de compactación

Los ensayos de compactación permiten analizar el comportamiento de un material frente a condiciones de humectación y/o saturación (densidad máxima y mínima). Mientras que para el ensayo Proctor es posible determinar la densidad máxima seca de un suelo en relación a su grado de humedad y una energía de compactación determinada. En esta investigación se usó el ensayo Proctor modificado para definir la densidad compactada seca a menor humedad que se conseguiría con el ensayo Proctor normal, se decidió usar este procedimiento simplemente por que las nuevas tecnologías fabrican máquinas que son capaces de aplicar mayores cargas al terreno en obras de construcción.

Los ensayos que se realizaron en esta sección son los necesarios para determinar la densidad máxima seca, mínima seca y máxima saturada. A continuación se realizó el ensayo Proctor modificado en el cual fue fundamental determinar los parámetros, densidad máxima compactada seca (DMCS) y humedad óptima, que serán utilizados para el resto de los ensayos geotécnicos.

La densidad mínima seca ($\gamma_{\min,seca}$), densidad máxima seca ($\gamma_{\max,seca}$) y densidad máxima saturada ($\gamma_{\max,sat}$) de la escoria blanca han sido determinadas empleando las normas ASTM D 4254 y ASTM D 4253, respectivamente. La mesa vibratoria utilizada para determinar las densidades máxima seca y saturada es la indicada en la norma NCh1726 Of. 1980. Cabe señalar que, el mismo material que se introdujo en el molde para efectuar el ensayo de densidad mínima seca, se empleó para determinar la densidad máxima seca y saturada en la mesa vibratoria. La muestra se vibró durante 8 minutos, para que los espacios vacíos dentro del molde disminuyeran y las partículas se acomodaran, con estos datos se calculó la densidad máxima del material. Este procedimiento fue realizado con la muestra seca y saturada.

El ensayo Proctor modificado se efectuó siguiendo lo indicado en la norma ASTM D 1557. Los moldes utilizados son los recomendados por la norma citada, las muestras se humectaban y se amasaban hasta conseguir todo el material quedara homogéneo, en este caso no fue necesario esperar las 24 horas indicadas por la norma ya que el material es bastante fácil de manipular y permeable. Después de esto con una poruña se introducía el material al molde, se golpeaba por capa, el mismo procedimiento se aplica para fabricar cada probeta, luego de golpear el material se quitaba el anillo superior del molde, y se enrasaba la probeta para quitar el material sobrante, así el material quedaba en el molde con dimensiones conocidas y se registraba el peso. En la Figura 8 se aprecia como quedaban las probetas para luego ser pesadas.



Figura 8. Probetas enrasadas para ensayo Proctor modificado.

En el ensayo Proctor modificado cada punto contiene una humedad que se asocia a un valor único de densidad seca, estos puntos se grafican y con la información de los tres más próximos al máximo, se realiza un ajuste parabólico, en otras palabras, los valores de humedad (ω) y densidad seca (γ_d) se usan para plantear

3 ecuaciones, resolviendo el sistema se obtienen los valores de a, b y c , para determinar la humedad óptima y su respectiva densidad seca (Villalobos, 2014).

A lo largo del ensayo se obtuvieron 10 puntos, cada uno con una humedad y densidad seca asociada, pero a raíz de que algunos no eran coherentes o se alejaban de la curva solo se graficaron los 5 más cercanos a la curva, para luego determinar la DMCS.

3.1.3. Estabilidad volumétrica

El tema de estabilidad volumétrica se puede considerar como el parámetro más importante de un punto de vista geotécnico, para decidir que uso darle a la escoria blanca. En estudios previos se ha definido como un material expansivo llegando a deformaciones volumétricas hasta de un 10%, con respecto a su altura (Motz y Geiseler (2001), Manso et al. (2004), Montenegro (2012), entre otros). Los ensayos que componen esta sección son el ensayo de expansión potencial, hinchamiento libre y colapso.

El ensayo de expansión potencial consiste en medir la variación volumétrica que podría tener una escoria blanca con respecto a su altura al entrar en contacto con el agua. En este ensayo se utilizan cilindros de acero con las mismas dimensiones de un molde de CBR. Como se ha comentado anteriormente uno de las propiedades de este material es que en algunos casos resulta ser altamente expansivo al contacto con el agua, por su composición mineralógica y química. Es necesario mencionar que la expansión esperada se puede manifestar solo en dirección vertical, ya que los moldes restringen lateralmente la muestra.

Los moldes que se fabricaron especialmente para esta investigación son de acero inoxidable, fueron sumergido durante varios días bajo el agua, ya que es requisito que evitar la oxidación y/o deformación. Estos moldes se forraban interiormente con un autoadhesivo plástico, luego se lubricaban con vaselina líquida para que la muestra pudiera moverse sin tener contacto directo con el acero.

Las cuatro probetas se prepararon preparadas según la densidad máxima seca y humedad óptima determinadas en el ensayo Proctor modificado. La norma que se siguió para preparar el ensayo es la ASTM D 4792. El criterio que se aplicó para determinar el tiempo que las muestras se mantuvieran sumergidas dependía de la deformación vertical que presentaban a lo largo del ensayo, el agua se mantenía a una temperatura de 70 ± 3 °C, variable que se corroboraba antes de tomar la lectura del dial mediante un termómetro digital. Las lecturas se realizaron cada 24 horas y el deformímetro que se utilizó tiene una precisión de 0,01 mm. Para asegurar la hidratación de las partículas y que no hubiera disminución de temperatura el ensayo se realizó dentro de un depósito aislado térmicamente. La duración de este ensayo fue de 27 días. En la Figura 9 se aprecia el recipiente aislado térmicamente que se utilizó en este ensayo, se tapaba con una plancha de poliestireno de alta densidad para evitar pérdida de agua en forma de vapor.

Actualmente no existe criterio válido para estimar el tiempo que dura el ensayo de expansión potencial. Por un lado, la norma ASTM D 4792 indica que: “ se debe mantener los especímenes bajo el agua por un mínimo de 7 días” y por otro, Montenegro et al. (2012) ha determinado que la escoria blanca desarrolla porcentajes de expansión al estar sumergida en agua a altas temperaturas.

Por último es necesario destacar que la norma recomienda utilizar una sobre carga de 4,54 kg, pero en nuestro caso se utilizó una sobre carga de 2,27 kg.

Para presentar los resultados se grafica la expansión de la muestra (%) en función de las horas en que las probetas permanecen sumergidas.



Figura 9. Recipiente para ensayo de expansión potencial.

El hinchamiento libre de una muestra de suelo se utiliza para estimar la expansión que podría experimentar un suelo en condiciones de servicio. Las condiciones iniciales (contenido de humedad e índice de vacíos) pueden ser representadas para simular las condiciones de puesta en obra.

Este ensayo se realizó teniendo en cuenta lo indicado en la norma ASTM D 5333. Cabe señalar que, si bien es una norma que se aplica a materiales cohesivos, se utilizó para determinar el comportamiento de la escoria ante la saturación con agua. El procedimiento de ensayo consistió en situar la muestra en el anillo del edómetro (dimensiones de 19 mm altura y 50mm de diámetro), enseguida se saturó completamente por una hora, se cargó la muestra con 5 kPa y se esperaron 5 minutos para establecer la lectura inicial de la probeta, lo cual se dejó por 24 horas.

El ensayo de potencial de colapso permite encontrar la magnitud del colapso, en una dimensión, que sufre una muestra natural de suelo luego de ser inundada con agua.

Este ensayo se desarrolló siguiendo la norma ASTM D 5333. El material que se utilizó es material con humedad óptima. Se utilizó el mismo equipo y anillo que en el ensayo anterior.

El ensayo de colapso ha sido realizado teniendo en cuenta una escala de carga de 12; 25,5; 51; 102; 203 kPa para luego saturar y volver a cargar con 406 kPa y llegando a los 820 kPa. Entre cada intervalo de carga se esperaba 3 horas o hasta que la gráfica deformación vertical en función del tiempo se estabilizara, esto quiere decir que la deformación vertical era nula.

González de Vallejo et al. (2002) y Jennings y Knight (1975) propusieron tablas (ver Tabla 12 y Tabla 13, respectivamente) en las que puede estimar si una muestra es o no potencialmente colapsable, en función de: densidad seca (γ_d), potencial de colapso e índice de colapso (I_e).

Tabla 12. Relaciones entre densidad seca, grado y potencial de colapso, Gonzáles de Vallejo (2002).

Grado de Colapso	Densidad seca (γ_d) (t/m^3)	Potencial de colapso (%)
Bajo	>1,4	< 0,25
Bajo a medio	1,2 - 1,4	0,25 - 1,0
Medio a alto	1,0 - 1,2	1,0 - 5,0
Alto a muy alto	< 1,0	> 5,0

Tabla 13. Clasificación del colapso, según Jenning y Knight (1975).

Grado colapso del espécimen	Índice de colapso, I_c (%)
Ninguno	0
Leve	0,1 - 2,0
Moderado	2,1 - 6,0
Moderadamente severo	6,1 - 10,0
Severo	> 10,0

3.1.4. Propiedades resistentes y de deformación

Para determinar las propiedades resistentes de la escoria en estudio se aplicaron los ensayos de consolidación en edómetro, CBR y corte directo, esto para analizar el comportamiento del material frente a diferentes cargas y en especial su resistencia al corte sometido en el ensayo de corte directo.

Continuando con la caracterización de la escoria blanca, se ha estudiado el fenómeno de la consolidación unidimensional del material según norma ASTM D 2435 . Este ensayo consiste en colocar una muestra de escoria blanca en el interior de un anillo metálico (el cual la confina lateralmente), mismas dimensiones que en el ensayo de hinchamiento libre. La preparación de la muestra es en la mismas condiciones que los ensayos anteriores, pero en este ensayo se logró introducir un 80% de la densidad que se alcanzó en el Proctor, ya que al intentar compactarla no se podía introducir más muestra en el anillo.

La muestra se inundó con agua destilada, luego se cargó verticalmente de forma progresiva. En los materiales arcillosos este asentamiento se produce de forma lenta, mientras que en los materiales granulares este descenso es instantáneo o

rápido. Dado que la muestra de escoria blanca se comporta como un material granular, el tiempo entre cada uno de los intervalos de carga se ha realizado cada 4 horas.

Los escalones de carga empleados, en kPa, son los siguientes: i) 12 ii) 25,5 iii) 51 iv) 102 v) 203 vi) 406 vii) 820, mientras que los de descarga fueron: i) 406 ii) 203 iii) 102 iv) 51 y v) 12 kPa. Para cada intervalo de carga se esperó 4 horas, mientras que para los intervalos de descarga se esperaron 2 horas, ya que la muestra no expandía en la dirección vertical.

La pérdida de masa durante el ensayo se corroboró pesando antes y después la muestra seca, debiendo coincidir la cantidad de suelo en ambos instantes. Los parámetros obtenidos en este ensayo son: el coeficiente de consolidación (C_v), coeficiente de compresión (C_c) y coeficiente de hinchamiento (C_s).

El ensayo CBR se desarrolló siguiendo el procedimiento de la norma ASTM D 1883. Este ensayo consistió en preparar 3 probetas con la humedad óptima del ensayo Proctor pero a diferentes niveles de compactación, se realizaron probetas con 10, 25 y 56 golpes, de 5 capas cada una.

Con un deformímetro de 0,01 mm de precisión se estableció una lectura inicial con respecto a la altura de probeta antes de sumergirlas, luego se mantuvieron bajo el agua por 96 horas; luego se tomó una segunda lectura y se estableció si la probeta desarrolló un cambio volumétrico. Finalmente se aplicó una carga (área circular de $19,65 \text{ cm}^2$) con una penetración a velocidad constante hasta llegar a una deformación de 0,2" (5,08 mm).

La Tabla 14 asocia los valores de CBR con la capa que se puede utilizar el material. También se puede determinar si es muy mala, mala a regular, buena o

excelente; permitiendo definir si el material en estudio sirve para constituir alguna capa de un terraplén, en caso de que se le quiera dar este uso.

Tabla 14. Clasificación y uso del suelo según el valor de CBR, según Assis A. (1998).

CBR	Clasificación cualitativa del suelo	Uso
2-5	Muy mala	Sub-rasante
5-8	Mala	Sub-rasante
8-20	Regular- Buena	Sub-rasante
20-30	Excelente	Sub-rasante
30-60	Buena	Sub-base
60-80	Buena	Base
80-100	Excelente	Base

El ensayo de corte directo se realizó siguiendo el procedimiento indicado en la norma ASTM D 3080. Este consta de tres fases: saturación, consolidación y corte. Las probetas fueron remoldeadas en una caja de corte de área cuadrada con dimensión de 100 mm x 100 mm. La muestra humectada no se pudo introducir completamente por que se llegaba a una densidad de 80% del valor encontrado en el Proctor.

Dado que la escoria se parece más a un suelo granular, es la razón por la que se han considerado los siguientes tiempos: saturación (30 min), consolidación (3 horas) y corte (velocidad de 0,2 mm/min), este último parámetro es relacionado al t_{90} determinado en la fase de consolidación. Finalmente el proceso de corte de la probeta se realizó hasta alcanzar una deformación horizontal del 20% del ancho total de la caja.

Los parámetros resistentes fueron determinados mediante cuatro probetas remoldeadas, las que fueron ensayadas a diferentes tensiones verticales de consolidación (50 kPa, 100 kPa, 150 kPa y 300 kPa, respectivamente).

3.2. Caracterización químico-mineral

Fluorescencia de rayos X (XRF)

La fluorescencia de rayos X permite determinar la composición química de una muestra mediante la medición de un espectro de XRF. Es necesario mencionar que este ensayo fue realizado por el laboratorio químico de la Compañía de Aceros del Pacífico (CAP).

El análisis realizado en esta investigación corresponde a ensayos realizados como control de calidad del acero manufacturado en CAP. La composición química fue obtenida a partir del promedio de 2.423 muestras.

Los ensayos mineralógicos efectuados a la escoria blanca en esta investigación fueron:

- Difracción de rayos X (XRD).
- Termogravimetría (TG/DTG).

Estos ensayos fueron realizados a dos muestras de escoria blanca, una inalterada y la otra extraída luego de realizar el ensayo de expansión potencial, con el fin de verificar si existió una variación en la estructura mineral luego que el material entrara en contacto con agua.

Difracción de rayos X

La difracción de rayos determina la composición mineralógica de un material. Los rayos X utilizados en este ensayo colisionan con los átomos de la muestra, estimulan las vibraciones armoniosas de los electrones, consiguiendo que emitan una radiación secundaria con la frecuencia de la radiación inicial y que luego de un proceso químico, se produzca una superposición (interferencia) con la radiación de los átomos de la muestra (Ziegert, 2011).

El equipo difractómetro empleado de marca Bruker, modelo D4, con longitud de onda (λ) igual a 1,541. En la realización de los ensayos fueron considerados los siguientes parámetros:

- Barrido angular entre $2\theta = 3^\circ$ y $2\theta=80^\circ$.
- Abertura (paso) en el que se detiene el emisor: $0,02^\circ$.
- Tiempo de detección en cada paso: 141 s.

El ensayo de difracción de rayos X (XRD) fue realizado en el Instituto GEA de la Universidad de Concepción.

Para complementar el estudio mineralógico, se empleó la termogravimetría y un análisis térmico diferencial. A continuación se explica de forma resumida en qué consiste este procedimiento.

Termogravimetría

La termogravimetría es una técnica en la que se registra de forma continua la pérdida de peso, a medida que se va incrementando la temperatura del horno a una velocidad controlada. Así mismo, también se va registrando computacionalmente la temperatura de la muestra con respecto a un elemento patrón. Reacciones endotérmicas y exotérmicas pueden ser detectadas a partir del uso de esta última técnica, las que pueden producirse a diferentes temperaturas.

El ensayo se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad de Concepción.

Se realizaron 3 ensayos termogravimétricos a muestras de escoria LFS, dos de estas correspondían a muestras representativas de material sin ensayar y el otro extraído luego de haber realizado el ensayo de expansión potencial. La duplicidad de los ensayos del material anhidro, fue necesaria para mejorar la representatividad de la muestra estudiada.

El objeto era buscar reacciones o transformaciones que pudieran ocurrir en el material luego de someterlo a una hidratación acelerada a las partículas (ensayo de potencial de expansión). Estos ensayos se realizaron en un equipo marca Netzsch, modelo STA 409 PG Luxx, bajo las siguientes condiciones:

- Gas: Nitrógeno.
- Flujo de aire: 100ml/min.
- Velocidad de calentamiento: 5°C/min.
- Temperatura: Temperatura ambiente hasta 1000°C.

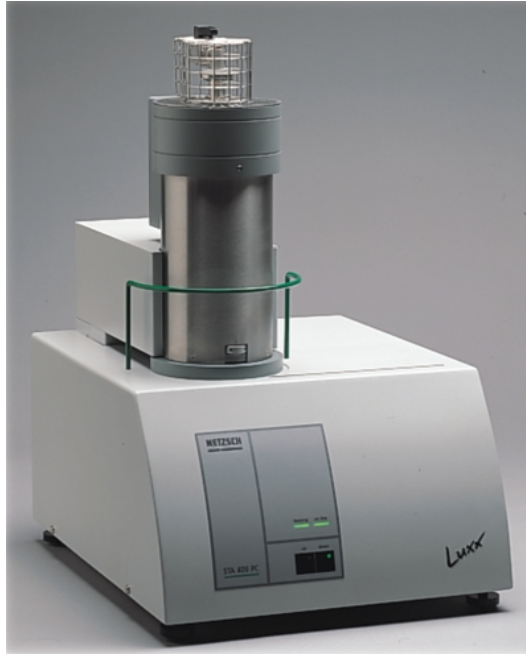


Figura 10. Equipo Netzsch, utilizado para el ensayo de termogravimetría.

3.3. Ensayos medioambientales

El ensayo medioambiental es fundamental en esta investigación, dado que no se puede emplear un material que contamine el medio ambiente. En caso que así fuera, sería necesario tomar medidas adicionales para asegurar un adecuado comportamiento medioambiental. En caso de que la escoria blanca sea inocua, en una tesis futura se estudiará un uso ingenieril.

Las muestras de escoria utilizadas para este ensayo inalteradas, con esto se busca determinar si tiene algún metal o compuesto químico nocivo para el entorno donde se aplique.

El ensayo realizado a la muestra es:

- Lixiviación (TCLP)

Ensayo que se realiza bajo la norma NCh 2754. Of. 2003 (Test TCLP – EPA 1311). Esta norma determina la concentración de ciertos metales que pueden ser lixiviados en forma natural, de acuerdo con las condiciones ambientales del lugar de almacenamiento de un residuo sólido. Esta norma se aplica a suelos expuestos y no expuestos, a residuos o desechos masivos, desechos o sedimentos, sólidos y/o líquidos, provenientes de operaciones mineras o industriales (Informe análisis químico (contaminantes), SECMEC, Enero 2017).

Los contenidos máximos de metales pesados que puede contener este material es determinado por la ley chilena de manipulación de desechos industriales, Decreto Supremo N°148, Reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos. En la Tabla 15 se muestran estos rangos.

Tabla 15. Concentraciones máximas permisibles, Decreto N°148.

Concentraciones máximas permisibles (CMP)	
Sustancia	CMP (Mg/L)
Arsénico	5,0
Cromo	5,0
Mercurio	0,2
Plomo	5,0
Selenio	1,0
Bario	100,0
Plata	5,0
Cadmio	1,0

Capítulo 4: Resultados

4.1. Presentación y análisis de resultados geotécnicos

En el siguiente capítulo se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de realizados en el Laboratorio de Geotecnia de la Universidad Católica de la Santísima Concepción.

La primera sección refiere a ensayos geotécnicos aplicados a la escoria blanca. Se realiza la clasificación y caracterización del material, se determina sus propiedades de compactación, análisis de estabilidad volumétrica, que es una de las materias más relevantes a la hora de darle un uso a este subproducto, y por último se presentan los resultados de los ensayos de carga que permiten determinar las propiedades resistentes del material.

En la segunda sección se realizan pruebas de tipo químicas-minerales, para conocer los compuestos químicos y los minerales que contiene este subproducto. El tema medioambiental es de suma importancia, ya que dependiendo de estos resultados se podrá tomar la decisión y/o recomendar el uso de la escoria blanca en actividades de construcción o ingeniería civil, es por esto que se presentan los resultados obtenidos para finalizar la caracterización del material.

4.1.1. Caracterización del material

La clasificación del suelo se realiza con partículas de 2,00 mm de tamaño máximo. Esto se considera porque se quiere encontrar un uso para el material fino de la escoria, las partículas finas son las capaces de desarrollar propiedades cementantes y determinar el comportamiento del material al entrar en contacto con

el agua. Al momento de realizar el ensayo para determinar el límite de plasticidad la escoria no presenta plasticidad por lo que se clasifica como No Plástica (NP).

En la Figura 11 se aprecia la curva granulométrica para el material en investigación. Es notorio que el material fino que pasa la malla #200 es cerca del 9% del total, con esto se determina que la escoria tiene bastante fino. En la abertura de tamiz de 0,425 mm queda retenido la mayor cantidad de material, esto se nota por el cambio de pendiente entre las mallas #40 y #20.

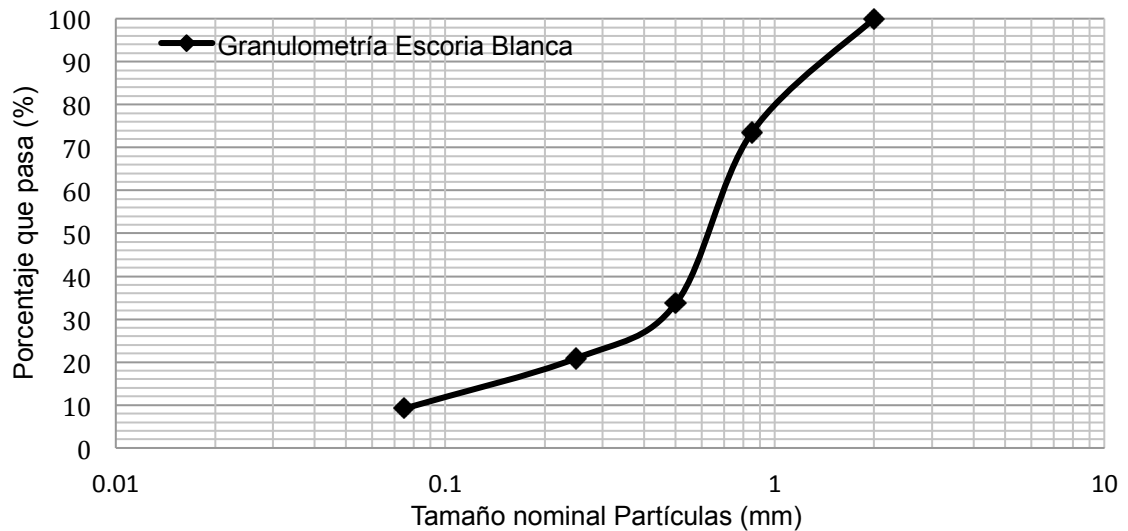


Figura 11. Curva granulométrica de la escoria LFS.

El material se clasifica SP-SM según clasificación USCS (Unified Soil Classification System), lo que corresponde a arena mal graduada con poco fino, tamaño limo. Para esta investigación y con los antecedentes que se presentan en la Figura 11 se determina que la escoria analizada es una arena limosa con tamaños de partícula de media a fina, sin plasticidad (Villalobos, 2014). La gravedad específica de las partículas (G_s) que se obtiene es igual a 2,6.

4.1.2. Propiedades de compactación

Los ensayos de compactación a los que se sometió el material son ensayos convencionales que se aplican para caracterizar un suelo, en este caso se inicia calculando la densidad mínima y máxima, lo que entrega los siguientes resultados. La densidad mínima seca ($\gamma_{d \text{ mín}}$) es de $7,16 \text{ KN/m}^3$, la densidad máxima seca ($\gamma_{d \text{ max}}$) es de $10,3 \text{ KN/m}^3$ y la densidad máxima saturada ($\gamma_{\text{sat máx}}$), saturando el molde con el material en su interior, es igual a $11,08 \text{ KN/m}^3$. Si comparamos estos valores con un suelo como la arena Biobío se puede notar que las densidades del material están por debajo de los valores que esta arena posee, llegando hasta un 40-50% de diferencia (Puga, 2012).

El ensayo Proctor modificado, se determinó con 5 puntos los que se pueden apreciar en la Figura 12, donde cada punto está asociado a una densidad y su respectiva humedad, la curva es representativa a los puntos encontrados y con esto se afirma que tienen un sentido lógico. En el máximo de la curva es donde se encuentra el valor de la densidad máxima compactada seca (DMCS) y su humedad óptima. Es necesario manifestar que la densidad máxima compactada seca y su humedad óptima se ubican alejada de las curvas de saturación de un 85% y 100%, como sucede en caso de las arenas mal graduadas con finos.

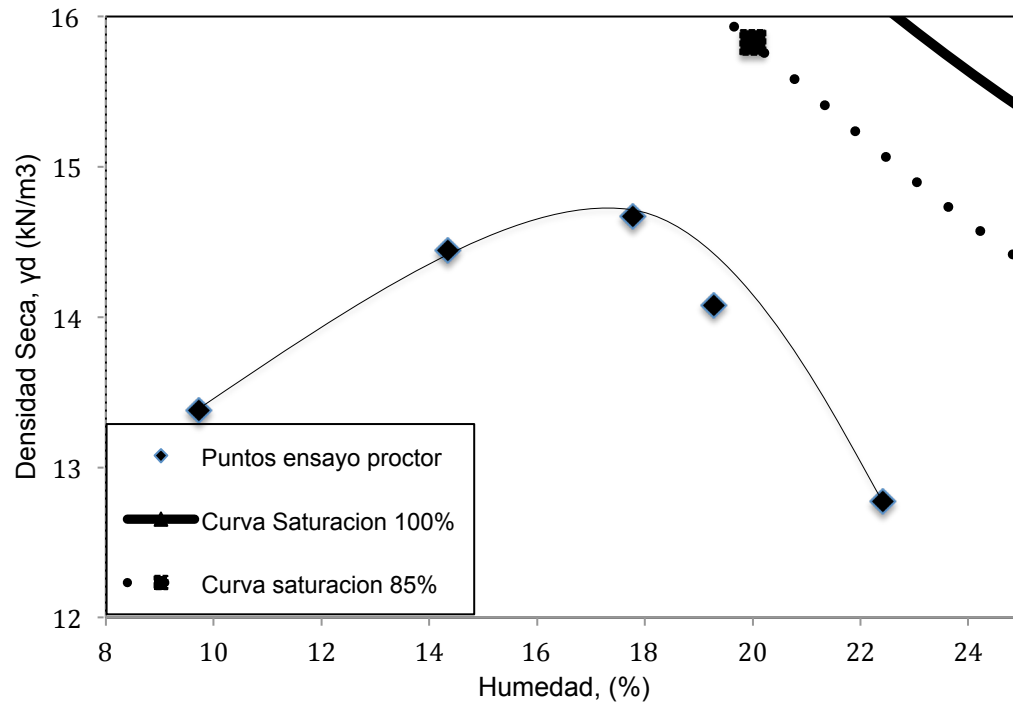


Figura 12. Resultado del ensayo Proctor modificado.

Para determinar los parámetros del ensayo Proctor modificado se utilizó la información de la Figura 12, donde se tomaron los tres puntos más cercanos a la DMCS y su humedad asociada, esto para realizar el ajuste matemático comentado en el apartado 3.1.2. , donde se obtuvo que la densidad máxima compactada seca (DMCS) es igual a $14,91 \text{ kN/m}^3$ con una humedad óptima de $16,5 \%$.

4.1.3. Estabilidad volumétrica

Este apartado se considera como el más importante al momento de caracterizar este material, debido a que estudios previos ((Motz y Geiseler (2001), Setién et al. (2008), Montenegro (2012)) han determinado que la escoria blanca es bastante inestable volumétricamente, todos los ensayos que se hicieron durante la investigación arrojaron resultados bastantes alentadores, ya que no se presentaron grandes cambios volumétricos.

En primer lugar se realizó el ensayo de expansión potencial, se sometió el subproducto a condiciones desfavorable, es decir, se hidrataron las partículas de magnesio y cal debido a la alta temperatura del agua en donde se sitúan las probetas (70 ± 3 °C.).

Las lecturas del dial de variación vertical se realizaron diariamente con el fin de calcular el porcentaje de deformación (expansión). En la Figura 13 se puede apreciar como fue el comportamiento de las muestras. Durante las primeras 45 horas surgieron las variaciones de altura más notorias en ambas probetas, llegando a una deformación de 0,23% y 0,17%, esta deformación se puede atribuir a una pequeña expansión, como consecuencia de la hidratación de las partículas magnesio y cal de la escoria, es decir la muestra hinchó y luego se mantuvo constante hasta el final del ensayo. En la Figura 13 se puede apreciar que a partir de las 200 horas hay una variación, es tan pequeña que se considera despreciable, error de lectura al momento situar el dial en el molde.

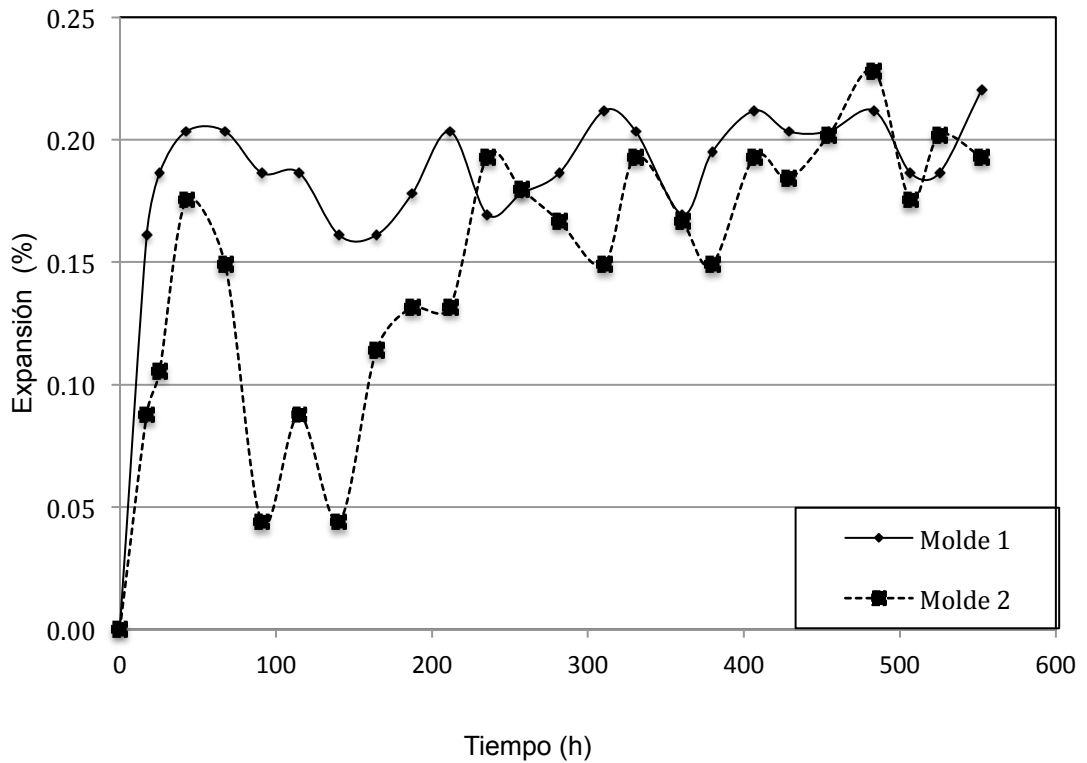


Figura 13. Expansión de la muestra en función del tiempo sumergido.

La temperatura es una variable importante a la hora de realizar el ensayo de expansión potencial, ya que las altas temperatura permiten acelerar la hidratación de las partículas que componen la escoria, es por esto que la norma ASTM D1883 indica que hay que sumergir las probetas en una piscina de agua con temperatura de $70 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$. Es por esta razón que el ensayo fue realizado dentro de un receptáculo aislado térmicamente, con el fin de evitar la pérdida de agua en forma de vapor (calor) y de no sobre exigir el calentador utilizado.

Al finalizar el ensayo se llega a la conclusión de que el material no es expansivo, las deformaciones verticales fueron mínimas. Según la norma ASTM D 2940, agregados que contienen componentes que puedan desarrollar hidratación, tal como las escorias de acero, deben tener valores de expansión menores que un

0,50%. Por lo que la escoria blanca proveniente de la industria siderúrgica de la región del Biobío no es expansiva.

Para retirar la escoria desde los moldes de acero inoxidable fue necesario ocupar un punto y un combo, ya que la muestra se encontraba sumamente cementada, en la Figura 14 se aprecia el color verde oscuro que se tornó la muestra, y a modo de comentario; el material emanaba un olor desagradable.



Figura 14. Desmolde del material al finalizar el ensayo de expansión potencial.

Con respecto al ensayo de hinchamiento libre se estableció que la muestra expandió cerca de 0,02 mm lo que corresponde a una deformación 0,0001%, lo que se considera despreciable.

Para fines de esta investigación se analizó el potencial de colapso como lo recomienda la norma ASTM D5333. Se calculó el valor de potencial de colapso (C_p) igual a 0,02%. Según los valores de la Tabla 13 el grado de colapso del espécimen es nulo.

4.1.4. Propiedades resistentes y de deformación

El ensayo de consolidación surge de la necesidad de conocer el grado de asentamiento que puede desarrollar un suelo, comúnmente se realiza en arcillas y limos, en este caso se utiliza para ver el comportamiento de la escoria en investigación.

El contenido de agua al inicio y final del ensayo es de 10% y 55.3% respectivamente. El valor de peso específico seco de suelo es igual a $12,36 \frac{kN}{m^3}$, el volumen de los sólidos es de $18,08 \text{ cm}^3$, lo que permite calcular la altura de los sólidos igual a $0,92 \text{ cm}$. Los índices de vacíos inicial y final de la probeta son 1,06 y 0,66 respectivamente. El grado de saturación inicial es 0,052 y final igual a 1.

En el Anexo I (Tabla I-20) se presentan los cálculos de índices de vacíos, volumen específico, tensión efectiva y el módulo edométrico (E_{ed}) para cada ciclo de carga. Los intervalos de carga se realizaron cada 3 horas, se verificaba que la curva de deformación vertical en función del tiempo se estabilizara, lo que permitía realizar la siguiente carga, este mismo criterio se utilizó para los ciclos de descarga. El cálculo de índice de vacíos (e) se fue determinó en cada intervalo de carga/descarga (ver Anexo I).

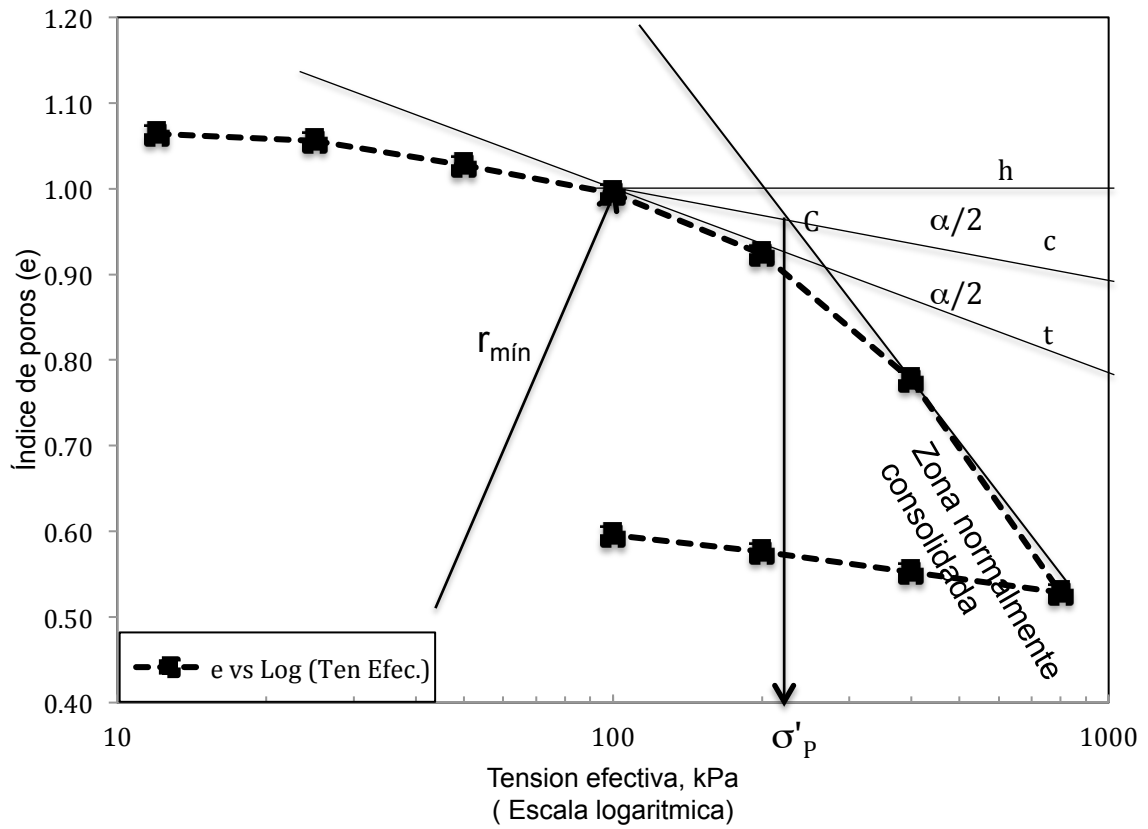


Figura 16. Resultado de ensayo de consolidación.

En la Figura 16 se realiza el cálculo de la tensión de preconsolidación (σ'_p) mediante el método de Casagrande (Villalobos, 2014), que tiene un valor de 215 kPa.

El valor del coeficiente de compresión (C_c) es 0,47, se comparó con el obtenido mediante lo establecido por Remdom-Herrero (1980), lo que dio un valor igual a 0,26, los cuales se consideraron razonables por su aproximación. Por otra parte el valor del coeficiente de hinchamiento (C_s) fue igual 0,1. Y cumplió con que $0,15 * C_c \leq C_e \leq 0,3 * C_c$ según Araneda (2016).

El ensayo CBR indica la capacidad de soporte del suelo para 3 escenarios determinados, para muestras de suelos con misma humedad pero diferente nivel de compactación, desde un suelo con baja compactación asociado a los 10 golpes hasta el suelo muy compactado con 56 golpes por capa. El tiempo que se mantuvieron las probetas en la piscina con agua fue de 96 horas como la norma lo indica, la deformación vertical que desarrollaron las muestras luego la saturación ha sido del rango de 0,004% por lo que se considera nula.

Los valores obtenidos debido a la carga del pistón se corrigieron, como se aprecia en la Figura 17. Si se observa la imagen a continuación es notorio determinar que a mayor grado de compactación la resistencia que desarrolló cada probeta es mayor. Finalmente con la Figura 18 se encontró el valor del CBR para el material a un 95% de la DMCS.

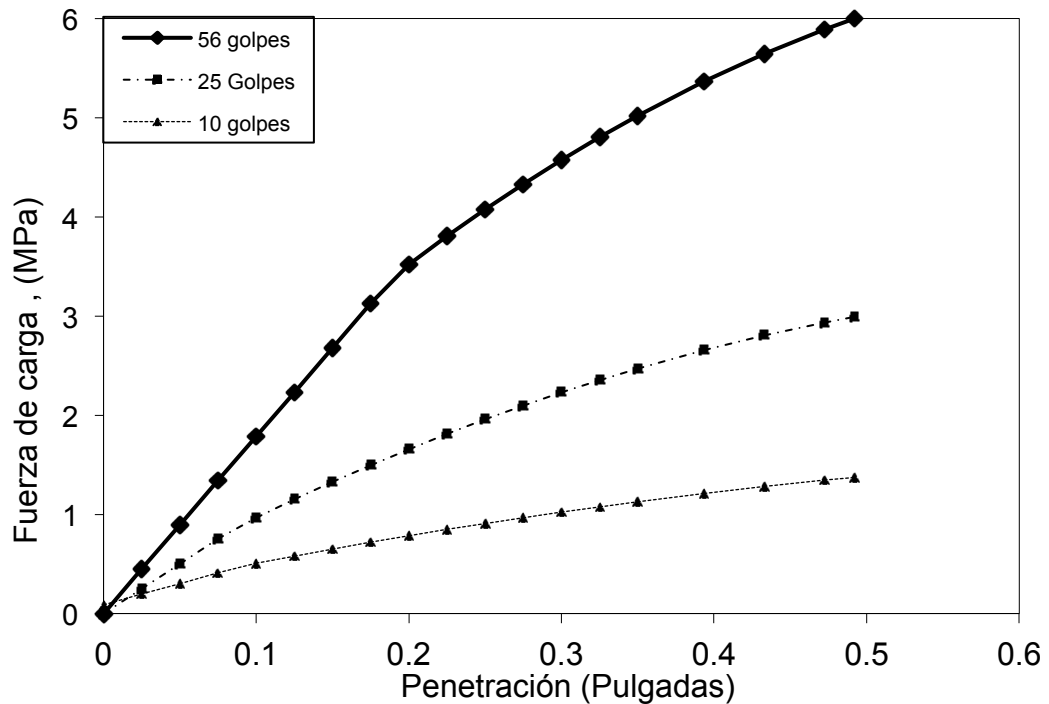


Figura 17. Curvas de penetración de CBR corregidas.

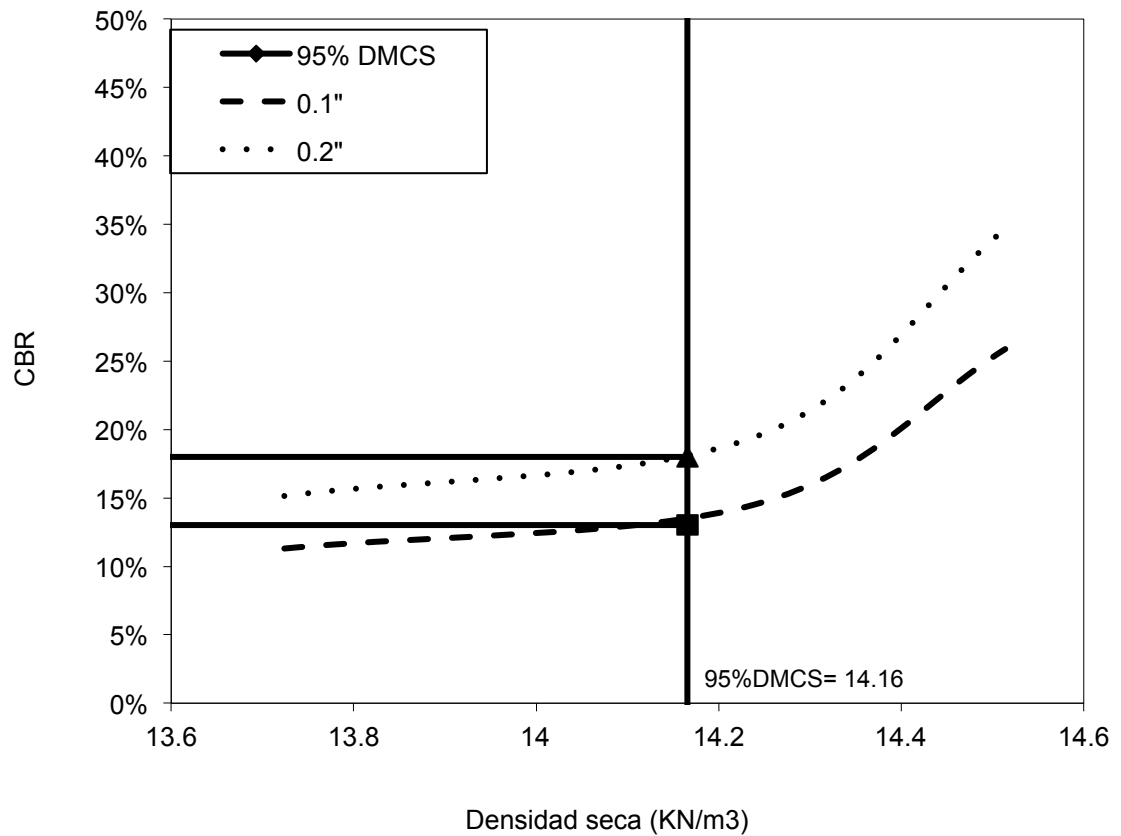


Figura 18. Resultado del ensayo de corte directo.

De la Figura 18 se obtiene que el valor de CBR es 13% para una penetración de 0.1" y que el valor del CBR es 18% para la penetración de 0,2", por lo que se determina, según la Tabla 14 , el material se puede utilizar como una capa sub-rasante de regular a buena.

Finalizando esta sección se presentan los resultados del ensayo de corte directo, el cual se desarrolló para analizar la resistencia que del subproducto a 80% de la DMCS, asociada la humedad óptima. Se consideró este valor por que cuando se remoldeó la muestra en la caja de corte no se pudo introducir todo el material.

En la Figura 19 se graficaron las tensiones alcanzadas por cada probeta, cada una desarrollo mayor tensión de corte a medida que la tensión de carga vertical

aumentaba. Se pudo observar que las tensiones de corte máximas ocurren a una deformación horizontal entre 1,8 a 3,5%.

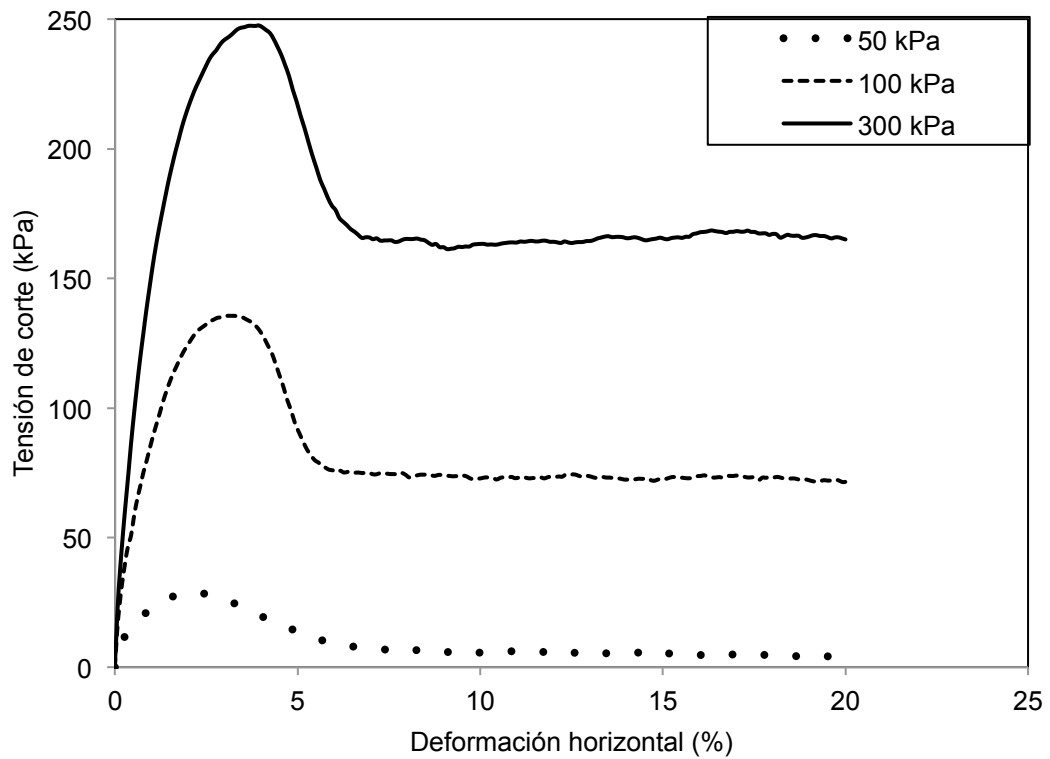


Figura 19. Tensión de corte en función de la deformación vertical.

En la Tabla 16, se agruparon los valores de tensión de corte, lo que corresponde al valor máximo que se obtuvo en cada muestra al momento de realizar el ensayo, con estos valores se encuentran el ángulo de fricción interno máximo ($\phi_{\text{máx}}$) y crítico (ϕ_{crit}).

Tabla 16. Valor de las tensiones en el ensayo de corte.

Tensión normal (kPa)	Tensión corte (kPa)	Tensión corte crítico (kPa)
50	28,8	3,2
100	135,6	58,3
300	247,6	134,7

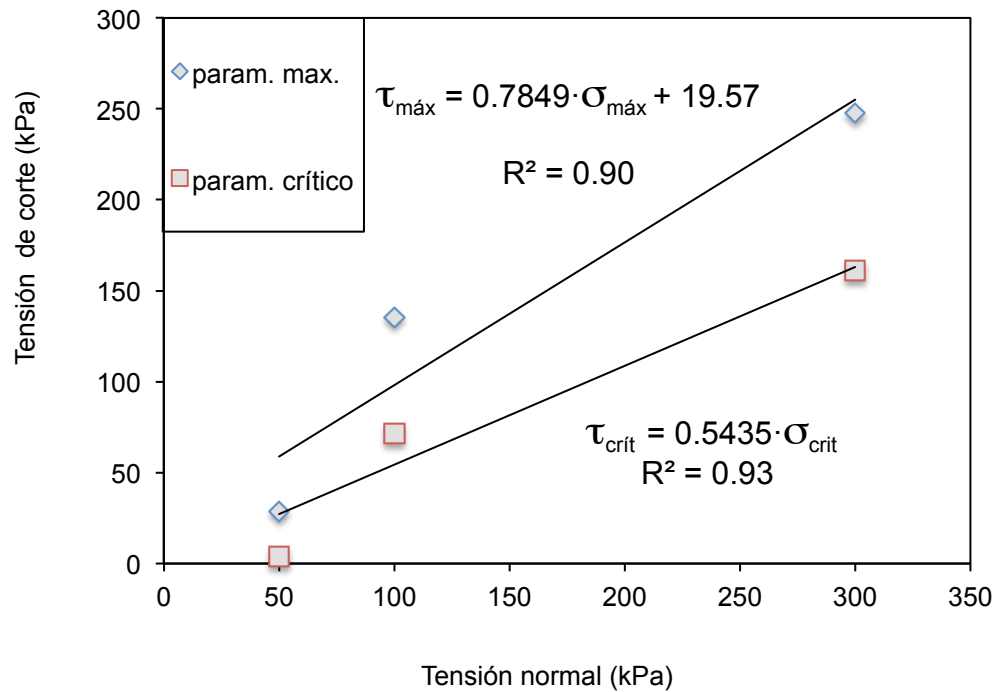


Figura 20. Resultado ensayo corte directo, obtención de ángulo de fricción interno máximo y crítico .

A partir del análisis de la Figura 20 se pudo determinar que el ángulo de fricción interna máximo es de 39°, mientras que el ángulo de fricción interna crítica es de 27°.

4.2. Presentación y análisis de resultados químicos.

A continuación se presenta la Tabla 17 , donde se aprecia el contenido de compuestos químicos que contiene la escoria en estudio.

Tabla 17. Contenido promedio de elementos químicos.

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	S	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅
Rango (%)	30-60	2-35	4,3-35	1-11,9	0,22-3,3	0,14-0,21	0-5	0,3-0,9	0-0,4
Media (%)	40,32	30,59	6,17	11,87	1,42	0,13	0,78	0,77	0,02
Desv. Estandar	3.4	5.1	2.9	4.7	1.0	0.5	0.2	0.1	0.2

Los valores obtenidos (Tabla 17) coinciden con los rangos indicados por otros autores, Tabla 6. La presencia de metales en el material están por debajo de las máxima concentraciones permisibles, pero de todas maneras se recomienda para investigaciones futuras realizar ensayos medioambientales para verificar que la utilización de este material no provoque un problema medioambiental si se llega a utilizar en algún proyecto de ingeniería civil y/o construcción.

Los elementos químicos más abundantes en la escoria son los óxidos de calcio, silicio, aluminio y magnesio, lo que se traduce en más de 85% de la masa total de material.

La presencia de contenidos mayores a 5% de óxido de magnesio, podrían indicar que se trata de un material expansivo. Esta hipótesis ya se desechó con el ensayo de expansión potencial (3.1), donde la máxima expansión que desarrolló la probeta de escoria LFS, fue de 0,25% (Figura 13).

Según la Tabla 7 (Tang, 1973), la escoria en estudio tiene una basicidad (CaO/SiO₂) de 1,32 por lo que su reactividad hidráulica es baja y los minerales que podrían estar presentes son el Olivino, fase RO, y Merwinita. Esto será analizado en siguiente apartado que corresponde a los resultados mineralógicos.

4.3. Presentación y análisis de resultados Mineralógicos.

La composición mineralógica fue obtenida a través de un ensayo de difracción de rayos x (XRD), donde los máximos indican el mineral reconocido para ese ángulo que está presente en la escoria LFS.

Nº	Mineral	Formula Química
1	Gelenita	$\text{Ca}_2\text{SiAl}_2\text{O}_7$

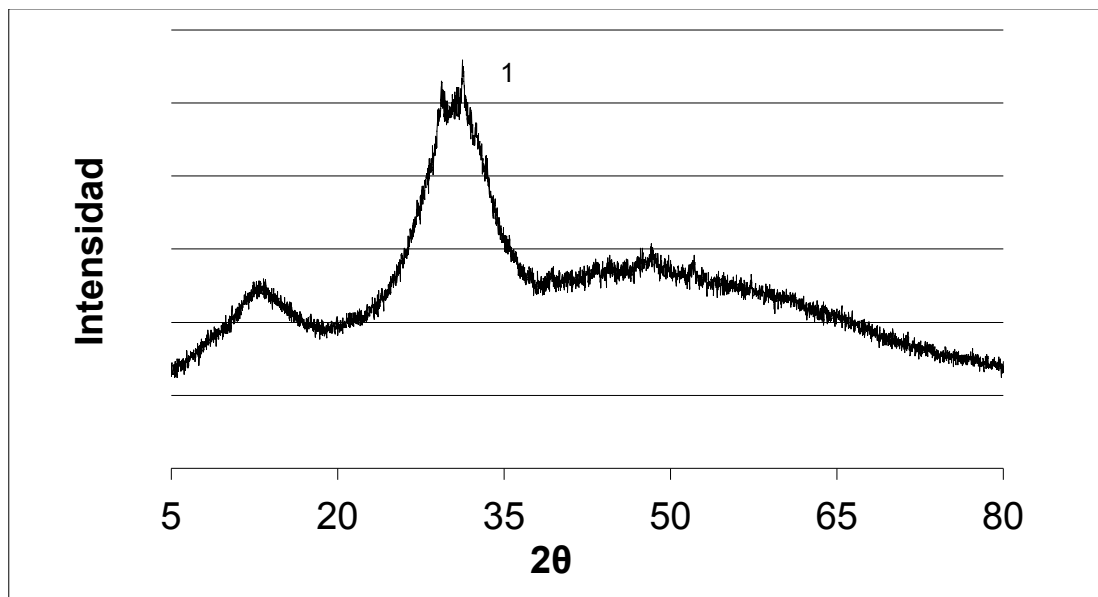


Figura 21. Ensayo XRD a escorias sin ensayos.

Como se puede apreciar sólo se reconoció un mineral, esto indica que el tipo de enfriamiento es rápido, lo que provoca que el ordenamiento de la estructura mineral sea tan rápido que lo convierte en un material amorfo.

En esta etapa de la investigación se descarta la presencia de una serie de minerales que han estado presentes en las investigaciones relacionadas al comportamiento, y caracterización de escorias de industria siderúrgica, mencionadas en la revisión bibliográfica. Estos materiales son: i) brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) ii) balcita (CaCO_3) iii) lima (CaO) iv) periclusa (MgO) y v) portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

Según la basicidad que presenta este material, podría existir presencia de Olivino, fase RO y Merwinita, que mediante el análisis de difracción de rayos X (XRD) no se pudieron identificar la presencia de estos compuestos. Con estos antecedentes se determina que no presenta minerales que podrían sufrir una hidratación a corto plazo, es necesario aclarar que este es el comportamiento de este material en particular.

Los ensayos de termogravimetría (TG/DTG) se realizaron bajo las condiciones indicadas en el apartado 3.2, donde se utilizó gas nitrógeno, lo que significa que se desarrolló bajo una atmosfera inerte. La dos primeras muestras, Figura 22 y Figura 23, corresponden a escorias LFS inalterada. Mientras que para el último se realizó para una muestra de escoria extraída al finalizar el ensayo de expansión potencial.

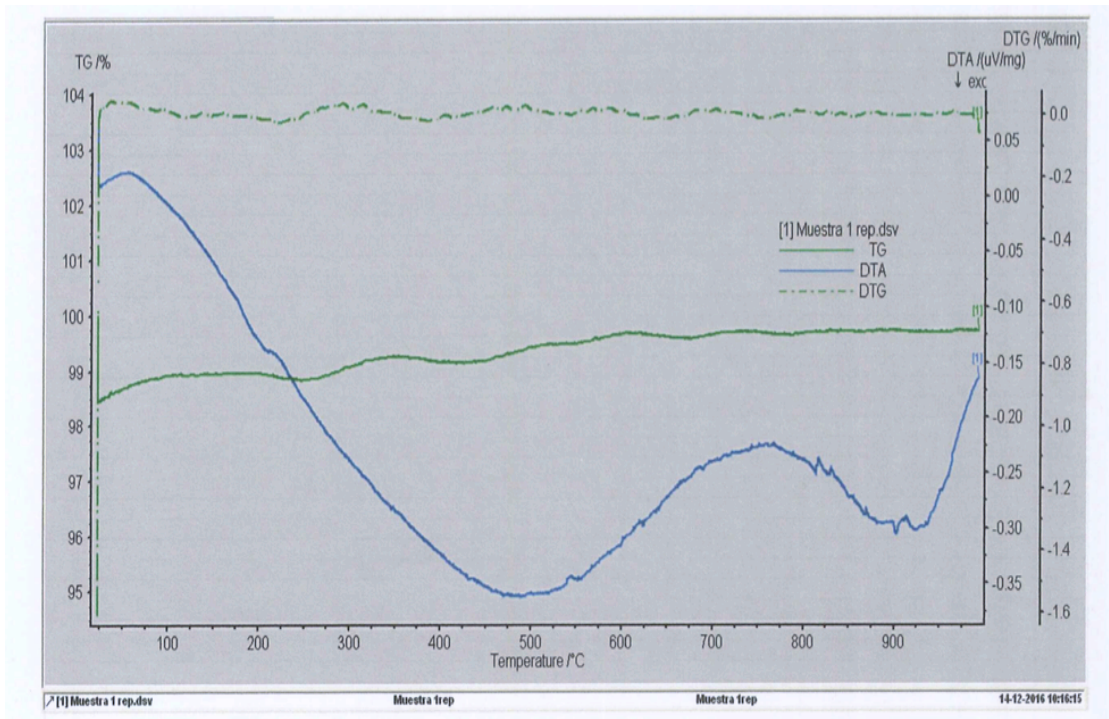


Figura 22. Ensayo TG/DTG a muestra de escoria inalterada, ensayo 1.

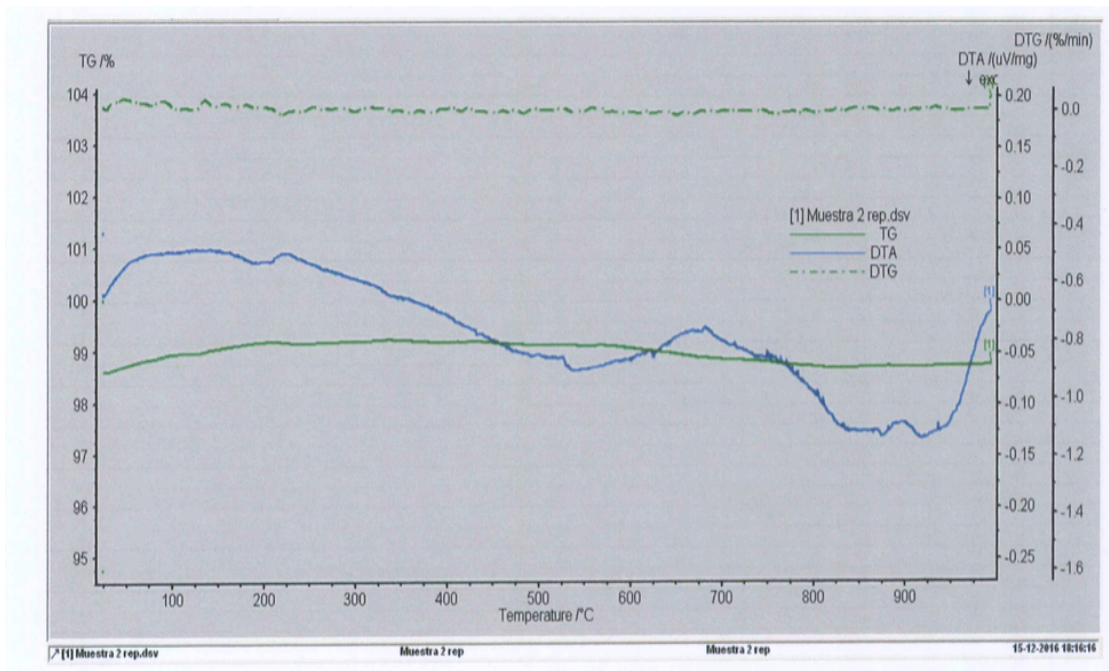


Figura 23. Ensayo TG/DTG a muestra de escoria inalterada, ensayo 2.

En ambas figuras se puede apreciar que la pérdida de masa no se provoca, esto se verifica con la curva TG/DTG y la variación de temperatura que no presenta ningún tipo de cambio mayor en la muestra. Los resultados son prácticamente iguales por lo que se determina que las muestras se comportan de la misma manera.

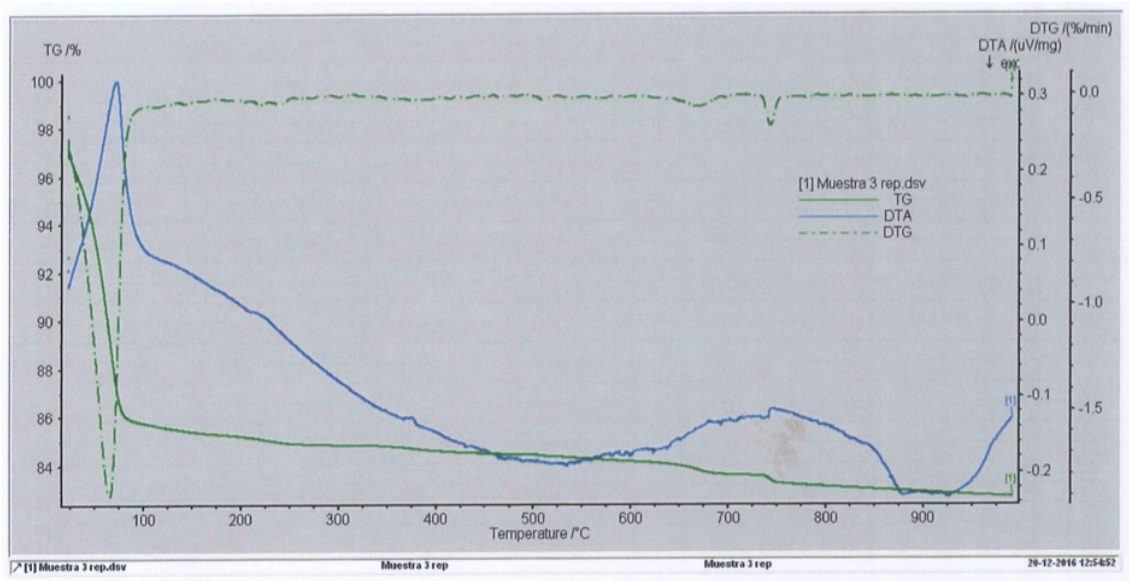


Figura 24. Ensayo TG/DTG a escorias luego de ensayo de potencial de expansión.

Para la muestra que se tomó luego del ensayo de expansión potencial, Figura 24, se aprecia que hay una pérdida de masa entre los 0 y 100°C, lo que correspondería solo a pérdida de humedad, luego se ve otra pérdida de masa a los 750°C, las cuales son menores.

4.4. Presentación y análisis de resultados Medioambientales.

El análisis medio ambiental que se realizó al material en estudio determinó que en ningún caso esta escoria presenta un peligro para el terreno en el que se quiera utilizar.

Los metales presentes no se consideran contaminantes, agrupados en la Tabla 18, ya que están por debajo de las concentraciones máximas permisibles que estipula el Decreto Supremo N°148. Para los elementos como mercurio, cromo, bario, selenio, arsénico y plata las concentraciones encontradas están por debajo de cantidad mínima que la máquina utilizada es capaz de detectar.

Tabla 18. Resultado ensayo TCLP.

Muestra	Plomo	Cadmio	Mercurio	Cromo	Bario	Selenio	Arsénico	Plata
Escoria Blanca	0,2	0,3	<0,02(*)	<0,2(*)	<0,5(*)	<0,2(*)	<0,1(*)	<0,2(*)
CMP (**) D.S: 148	5,0	1,0	0,2	5,0	100,0	1,0	5,0	5,0

(*) Valor límite de cuantificación. (**) CMP: Concentración Máxima Permisible.

Capítulo 5: Conclusiones

Debido a que la producción de acero depende del desarrollo del país, se puede tener una idea de cómo vendrá la manufactura de este material a lo largo de los años. Es evidente que darle un uso a este material que se encuentra en patios de almacenamientos ayudará en muchos aspectos al medioambiente, comunidad y empresas fabricantes. Debido a que se puede disminuir la explotación de recursos naturales, en cierta proporción, ya que el abastecimiento de este subproducto está limitado directamente por la producción de acero que se genere en la región.

Los resultados de los ensayos geotécnicos indican que el material en estudio tiene densidades menores a suelos con similares características, si se compara con uno equivalente como por ejemplo arenas de ríos. Se recomienda verificar su comportamiento en la mezcla con otros suelos, esto con el fin de determinar si cumple los requisitos para reemplazar algún material que se utilice en construcción. Por otro lado, según el valor del CBR para una penetración de 0,2" es de 18%, lo que corresponde a sub rasante de regular a buena. Finalmente en el ensayo de corte directo se encuentran los valores de los ángulos de fricción interna máximo de 39° y crítico de 27°.

La estabilidad volumétrica presentada por el subproducto analizado es bastante buena ya que no genera cambios de volúmenes importantes. El hinchamiento máximo que tuvo la muestra en el ensayo de expansión potencial fue de 0,25%, menor a lo indicado en la norma ASTM D2940, para el uso de escorias de acero se limita como valor máximo un 0,50% de expansión. En conclusión la muestra no presenta tener efectos perjudiciales al entrar en contacto con el agua, sino que se forma una masa bastante compacta y cementada.

Los componentes químicos que presentaron las muestras están dentro de los rangos que definen los autores de la Tabla 6, esto demuestra que la fábrica de

donde se obtuvo la escoria en investigación utiliza similares procedimientos y materias primas que la industria europea. Los resultados de los ensayos termogravimétrico indican que es un material bastante amorfo, esto significa que el proceso de enfriamiento que se le aplica a esta escoria es bastante rápido. Frente a su mineralogía se descarta que hayan minerales que tengan reacción desventajosa en entrar contacto con el agua, no hay presencia de periclasa, la cual genera grandes aumentos volumétricos en otras escorias blancas generadas por industrias acereras en España (Montenegro ,2012).

Por último los resultados de los ensayos medioambientales son positivos, este material no tiene ningún tipo de metal o compuesto químico que sea nocivo para el medioambiente, por lo que se recomienda realizar futuras investigaciones donde se utilice este material junto a mezclas de suelos y se compruebe sus propiedades geotécnicas, con el fin de encontrarle un uso para actividades ingenieriles.

Como líneas de investigación futura se recomienda estudiar desde un punto de vista económico los beneficios y desventajas que se pueden presentar al momento de ocupar este material en proyectos de ingeniería. Como se ha mencionado anteriormente es necesario realizar pruebas geotécnicas, químicas-minerales en mezclas de escoria blanca con diferentes suelos para determinar su comportamiento y si produce un mejoramiento en el terreno que se quiere aplicar, además de corroborar los resultados obtenidos en laboratorio con pruebas de campo (in situ).

Capítulo 6: Bibliografía

1. Araneda Ruiz, Jorge (2016): "Introducción a la mecánica de suelos y temas asociados" Editorial Trama impresiones S.A., 1ª edición.
2. Arribas I, San Jose JT, Vegas I, Hurtado J, Chica J. (2010). "Application of steel slag concrete in the foundation slab and basement wall of the Tecnalia kubik building", 6th European Slag Conference Proceedings. Madrid, Euroslag (2010): 251-264.
1. Bosela P, N D, Obratil R, Patel A. (2009). "Fresh and hardened properties of pavin concrete sith steel slag aggregate", Propiedades para firmes de hormigón fabricado con áridos siderúrgicos. Carreteras: Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera 4 (166):55- 66.
2. ASTM D1557 (2012): "Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)), American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual book of ASTM Standards.
3. ASTM D 1883 (1999): "Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory Compacted Soils", American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual book of ASTM Standards.
4. ASTM D 2487 (2000): "Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)", American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual Book of ASTM Standards.
5. ASTM International, ASTM D 2435 (1996): "Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils", American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual book of ASTM Standards.
6. ASTM D 2940 (2003): "Standard Specification for Graded Aggregate Material for Bases or Subbases for Highways or Airports", American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual Book of ASTM Standards.
7. ASTM D 421 (2007): "Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants", American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual Book of ASTM Standards.
8. ASTM D 422 (2002): "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils", American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual Book of ASTM Standards.
9. ASTM D 3080 (2004): "Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions", American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual Book of ASTM Standards.

10. ASTM D 4318 (2000): "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils", American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual Book of ASTM Standards.
11. ASTM D 4546 (2003): "Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Cohesive Soils", American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual Book of ASTM Standards.
12. ASTM D 4792 (2000): "Standard Test Method for Potential Expansion of Aggregates from Hydration Reactions", American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual Book of ASTM Standards.
13. ASTM D 5333 (2003): "Standard Test Method for Measurement of Collapse Potential of Soils", American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual Book of ASTM Standards.
14. CAP Reporte anual (2012).
15. CAP memoria anual (2015).
16. Celemín, M., Montenegro, J.M., Cañizal, J. y González, J.J. (2007). "Primeros estudios sobre la utilización de la escoria blanca de acería eléctrica para la mejora de suelo marginales en la construcción de terraplenes", VI Congreso Chileno de Geotécnica.
17. Decreto Supremo N°148 del 12 de Junio (2003). "Reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos", 16 de Junio de 2004, Chile.
18. Euroslag (pagina consultada el 10 de Noviembre de 2016) [Online]. Dirección: <http://www.euroslag.com/>
19. Euroslag (2012): "Position paper Abril 2012" http://www.euroslag.com/fileadmin/_media/images/Status_of_slag/Position_Paper_April_2012.pdf
20. Geiseler, J. (1996). "Use of steelworks slag in Europe", Waste Manage. Res., 16 (1–3), 59–63.
21. Gonzáles de Vallejo, L. (2002). "Ingeniería Geológica". Editorial Prentice Hall. Madrid.
22. Herrero T. (2015). "Estudio del efecto de la hidratación de la escoria blanca de acería de hea: aplicación en pastas y morteros de cemento". Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Bilbao. 1-252.
23. Juckes, L. M. (2003). "The volume stability of modern steelmaking slags", Trans. Inst. Min. Metall. C, 112(3), 117–197.
24. Kanagawa, A., and Kuwayama, T. (1997). "The improvement of soft clayey soil utilizing reducing slag produced from electric arc furnace", Denki Seiko, 684, 261–267.
25. Kim SW, Lee YJ, Kim KH. (2012). "Bond behavior of RC beams with electric arc furnace oxidizing slag aggregates", J. Asian Architect Build Eng 11(2) ,359-66.

26. Koros, P. J. (2003). "Dust, scale, slags, sludges: Not wastes, but sources of profits", *Metall. Mater. Trans. B*, 34(6), 769–779.
27. Lea, F. M. (1974). "The chemistry of cement and concrete", 3rd Ed., Ed- Ward Arnold, New York.
28. Manso, J.M., Losáñez, M., Polanco, J.A. y González, J.J. (2005). "Ladle furnace slag in construction", *Journal of Materials of Civil Engineering*, 17, 513-518.
29. Montenegro J.M. (2012): "Valorización de suelos no aprovechables de la traza mediante su mezcla con escoria blanca de acería eléctrica en la construcción de infraestructuras del transporte terrestre: Ejecución de un terraplén experimental". Tesis doctoral, Universidad de Cantabria, 1-471.
30. Montenegro J.M.; Celemín-Matachana M., Ph.D.; Cañizal J., Ph.D.; and Setién J., Ph.D. (2013). "Ladle furnace slag in the construction of embankments: Expansive behavior", *Journal of Materials of Civil Engineering*, 25, 972-979.
31. Montgomery, D. G., and Wang, G. (1991). "Instant-chilled steel slag aggregate in concrete-strength related properties." *Cem. Concr. Res.*, 21(6), 1083–1091.
32. Motz, H., and Geiseler, J. (2001). "Products of steel slags, an opportunity to save resources", *Waste Manage*, 21(3), 285–293.
33. Mroueh UM, Eskola P, Laine-Ylijoki J. (2001). "Life-cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction". *Waste manage* 21(3),271-7.
34. Nicolae M., Vilciu I., and Zâman F. (2007). "X-ray diffraction analysis of steel slag and blast furnace slag viewing their use for road construction", *UPB Scientific Bulletin Series B*, vol. 69, no. 2, pp. 99–108.
35. Papayianni, I., and Anastasiou, E. (2006). "Optimization of ladle furnace slag for use as a supplementary material", *Measuring, monitoring and modeling concrete properties*, M. S. Konsta-Gdoutos, ed., Springer, Rotterdam, The Netherlands, 411–417.
36. Qian, G.R., Sun, D.D., Tay, J.H. y Lai, Z.Y. (2002). "Hydrothermal reactions and autoclave stability of Mg bearing RO phase in steel slag", *British Ceramics Transactions*, 101, 159-164.
37. Radenovic A., Malina J., and Sofilic T. (2013). "Characterization of ladle furnace slag from carbon Steel production as a potential absorbent", *Hindawi Publishing Corporation*, 1,1-6.
38. Rodriguez, A., Manso, J. M., Aragón, A., and González, J. J. (2009). "Strength and workability of masonry mortars manufactured with ladle furnace slag", *Resources, Conservation and Recycling.*, 53(11), 645–651.
39. Rojas, M. F., and de Rojas, M. I. S. (2004). "Chemical assessment of the electric arc furnace slag as construction material: Expansive compounds", *Cement Concr. Res.*, 34(10), 1883–1888.

40. Setién, J., Hernández, D., and González, J. J. (2009). "Characterization of ladle furnace basic slag for use as a construction material", *Constr. Build. Mater.* 23(5), 1788–1794.
41. Shelburne, W. y DeGroot, D. J. (1998). "The use of waste & recycled materials in highway construction", *Civil Engineering Practice*, 13, 5-15.
42. Shi, C. (2002). "Characteristics and cementitious properties of ladle slag fines from steel production", *Cement Concr. Res.*, 32(3), 459–462.
43. Shi, C. (2004). "Steel slags—Its production, processing, characteristics, and cementitious properties", *J. Mater. Civ. Eng.*, 16(3), 230–236.
44. Shi, C., and Hu, S. (2003). "Cementitious properties of ladle slag fines under autoclave curing conditions", *Cement Concr. Res.*, 33(11), 1851–1856.
45. Tang, M. 1973 . "An investigation on mineral composition of steel slag for cement production", *Research Rep.*, Nanjing Institute of Chemical Technology, Nanjing, China in Chinese.
46. Tossavainen, M., Engstrom, F., Yang, Q., Menand, N., Lidstrom-Larsson, M., and Bjorkam, B. (2007). "Characteristics of steel slag under cooling conditions", *Waste Manage.* 27(10), 1335–1344.
47. Villalobos F. (2014):" *Mecánica de suelos*" Editorial UCSC, 1ª edición.
48. Yildirim, I. Z., and Prezzi, M. (2011). "Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag", *Adv. Civ. Eng.*, 2011(1), 1–13.

Capítulo 7: Anexo

I. ANEXO. “Ensayos Geotécnicos”

Granulometría

Tabla I-1. Datos para granulometría.

Tara + Seco (g)	491
Tara + material lavado (g)	456
Tara (g)	99
Material Seco (g)	392
Material Lavado Seco (g)	357
Fino (g)	35
Fino (%)	8,9

Tabla I-2. Tabla protocolizada para granulometría.

Nº Malla (#)	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	Retenido parcial (%)	Material que pasa (%)
4	4,75	0	0,0	100
10	2	0	0,0	100
20	0,85	104	26,8	73,2
40	0,425	156	39,8	33,4
60	0,25	50	12,8	20,6
200	0,075	46	11,7	8,9
	Residuo	1	(<3)	

Densidad mínima y máxima

Una vez vaciado el material en el recipiente con el especial cuidado que la norma indica se pesó y se registraron los datos en la Tabla I-3.

Tabla I-3. Datos para cálculo densidad mínima .

Peso molde (g)	Peso molde + masa de suelo (g)	Peso suelo (g)	Volumen molde (cm ³)
3.590	5.644	2.054	2.833

Entonces se calculó la densidad mínima ($\gamma_{d \text{ min}}$) obteniendo un valor de $0,73 \frac{g}{cm^3} = 7,1 \frac{kN}{m^3}$.

Para la densidad máxima en condición seca, la altura de suelo dentro del molde bajó considerablemente luego de someterlo en la mesa vibratoria, por lo tanto el volumen disminuyó, los valores se registraron en la Tabla I-4.

Tabla I-4. Datos para cálculo densidad máxima.

Peso molde (g)	Peso molde + masa de suelo (g)	Peso suelo (g)	Volumen (cm ³)
3.590	5.644	2.054	1.950

Entonces se calculó la densidad máxima ($\gamma_{d \text{ máx}}$), obteniendo un valor de $1,05 \frac{gr}{cm^3} = 10,3 \frac{kN}{m^3}$.

Y finalmente se saturó la muestra para disminuir los espacios vacíos que se llenaron con agua y se confeccionó la Tabla I-5.

Tabla I-5. Datos para cálculo densidad máxima para muestra saturada.

Peso molde (g)	Peso molde + masa de suelo (g)	Peso suelo (g)	Volumen (cm ³)
3.590	5.644	2.054	1.815

Se obtuvo un valor de densidad máxima ($\gamma_{\text{sat máx}}$) para muestra saturada igual a $1,13 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} = 11,1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$.

Gravedad Específica de las partículas sólidas

El valor de la gravedad específica es usado para determinar los volúmenes de las partículas, agua y vacíos presentes en el suelo. El término partícula sólida hace referencia a un grano mineral de origen natural que no es soluble en el agua.

Para comenzar se registró la masa de el picnómetro y se calibró a temperatura ambiente. A continuación se muestran los datos obtenidos en el ensayo.

Tabla I-6. Datos para cálculo gravedad específica (G_s).

Datos picnómetro y muestra		
Datos	Valor	Unidad
Nº de picnómetro	19	-
Masa muestra seca	58	g
Masa picnómetro + masa muestra seca + masa de agua	725	g
Temperatura	21,6	° C
Densidad agua	0,998	g/cm^3
Masa picnómetro + masa de agua (20°C)	689,4	g

Se conoce la densidad del agua a diferente temperatura, como se muestra en la Tabla I-7.

Tabla I-7. Densidad del agua a distinta temperatura.

Temperatura (°C)	Densidad (g/cm ³)
20	0,99823
21	0,99802
21.6	0,99789
22	0,99780

Finalmente se calcula la densidad de las partículas y corrigiendo por la temperatura, se encontró un valor de;

$$G_S = 2.6$$

Ensayo Proctor

Una vez obtenidos los puntos, es decir cada densidad asociada a una humedad, Se realizó un ajuste parabólico con los tres próximos al máximo. Los valores de humedad (ω) y densidad seca (γ_d) se usaron para plantear 3 ecuaciones, se resolvió el sistema donde se obtuvieron los valores de a, b y c , para determinar la humedad óptima y su respectiva densidad (Villalobos, 2014).

$$\gamma_{d,max} = -a\omega^2 + b\omega + c \quad (1)$$

y

$$\omega_{opt} = \frac{b}{2a} \quad \text{y} \quad \gamma_{d\text{ máx}} = \frac{b^2}{4a} + c \quad (2)$$

Donde

$\gamma_{d,máx}$: Densidad seca máxima, gr/cm³

ω_{opt} : Humedad óptima, %.

A continuación se presenta la Tabla I-8 con información sobre molde y energía que se utilizó para este ensayo.

Tabla I-8. Datos del ensayo Proctor modificado.

Proctor	Volumen molde (cm ³)	Pisón (kg)	Nº capas	Altura de caída (cm)	Nº golpes por capa	Energía de compactación (kNm/m ³)
Modificado	941	4,5	5	45,72	25	2.700

En Tabla I-9 se aprecia lo valores obtenidos de cada muestra ensayada.

Tabla I-9. Datos obtenidos para cada probeta.

Vol. molde (cm ³)	Masa molde (g)	Muestra + molde (g)	Masa de la Muestra (g)	Den. húm. del suelo (g/cm ³)	Masa cápsu (g)	Masa cápsula + suelo húmedo (g)	Masa cápsula + suelo seco (g)	Masa suelo seco (g)	Masa de agua en el suelo (g)	Cont. de hum. (%)	Den. seca (g/cm ³)
941	1.994	3.402	1.408	1,50	168	575	539	371.	36	9,7	1,36
941	1.994	3.578	1.584	1,68	165	436	402	237	34	14,3	1,47
941	1.994	3.651	1.657	1,76	165	430	390	225	40	17,7	1,50
941	1.994	3.605	1.611	1,71	158	473	422	264	51	19,3	1,43
941	1.994	3.490	1.496	1,59	162	496	435	273	61	22,3	1,30

Tabla I-10. Parámetros de ensayo Proctor modificado.

Muestra	Contenido de Humedad (%)	Densidad Seca (kN/m ³)
1	9,72	13,3
2	14,35	14,4
3	17,78	14,7
4	19,28	14,0
5	22,42	12,8

Se reemplazaron los datos en la ecuación (1) y ecuación (2) donde se obtuvo que la densidad máxima compactada seca (DMSC) es de 1.52 gr/cm³= 14,91 kN/m³ a una humedad optima de 16.5 %.

CBR

A continuación se presentan los cálculos realizados para este ensayo.

Se calcula la densidad inicial húmeda de la muestra.

$$\gamma_i = \frac{M_T - M_m}{V_m} \quad (3)$$

Donde

- M_T : Masa de molde con el suelo compactado, gr.
- M_m : Masa del molde vacío, gr.
- V_m : Capacidad volumétrica del molde, cm^3 .
- γ_i : Densidad inicial de la muestra húmeda, gr/cm^3 .

Luego se calcula la densidad compactada seca a partir del contenido de humedad que posee la muestra en preparación.

$$\gamma_{d,prep} = \frac{\gamma_i}{1 + \omega_{prep}} \quad (4)$$

Donde

- $\gamma_{d,prep}$: Densidad seca de la muestra en preparación, gr.
- γ_i : Densidad inicial de la muestra húmeda, gr/cm^3 .
- ω_{prep} : Contenido de humedad en la preparación, %.

$$\omega_{prep} = \frac{M_w}{M_d} = \frac{M_T - M_S - M_R}{M_T - M_w - M_R} \quad (5)$$

Donde

- M_w : Masa de agua en el suelo, gr.
- M_d : Masa de suelo seco, gr.
- M_T : Masa total de la muestra húmeda sobre el recipiente, gr.
- M_S : Masa de suelo seco en la muestra, gr.
- M_R : Masa recipiente o tara, gr.
- M_S : Masa de suelo seco en la muestra, gr.

$$\omega_f = \frac{M_{wi}}{M_{di}} = \frac{M_{Ti} - M_{Si} - M_{Ri}}{M_{Ti} - M_{wi} - M_{Ri}} \quad (6)$$

Donde

- M_{wi} : Masa de agua en el suelo después de inmersión, gr.
- M_{di} : Masa de suelo seco después de inmersión, gr.
- M_{Ti} : Masa total de la muestra húmeda sobre el recipiente después de inmersión, gr.
- M_{Si} : Masa de suelo seco en la muestra después de inmersión, gr.
- M_{Ri} : Masa recipiente o tara después de inmersión, gr.
- M_{Si} : Masa de suelo seco en la muestra después de inmersión, gr.

Luego de saturar la muestra con un mínimo de 96 horas, se lee el dial (deformímetro vertical) para verificar si ocurre una deformación vertical producto de la saturación. Se determina la humedad final antes de aplicar las cargas sobre la muestras.

En la Tabla I-11 se muestran la mediciones iniciales obtenidas con las ecuaciones (3), (4) y (5), respectivamente.

Tabla I-11. Datos de confección de la muestras para CBR.

CBR	CONFECCIÓN			Unidad
Molde N°	20	15	10	-
N° Golpes / capa	10	25	56	-
Masa de molde con suelo compactado (M_T)	8.102	8.115	6.841	g
Masa molde (M_m)	4.761	4.670	3.250	g
Masa suelo húmedo ($M_T - M_m$)	3.341	3.445	3.591	g
Volumen molde (V_m)	2.117	2.119	2.121	cm ³
Densidad inicial húmeda (γ_i)	1,58	1,63	1,69	g/cm ³
Masa suelo húmedo + tara (M_{TC})	201	240	450	g
Masa suelo seco + tara ($M_S + M_R$)	188	222	414	g
Masa tara (M_R)	104	103	207	g
Masa del agua (M_W)	13	18	36	g
Masa suelo seco (M_S)	84	119	207	g
Humedad Preparación	15,48	15,13	17,39	%
Densidad Seca Compactada ($\gamma_{d,prep}$)	1.37	1.41	1.44	g/cm ³

Luego de la saturación de los moldes no se registra un aumento o descenso en la altura de las muestras por lo que no se presentan los valores del dial. Luego de ensayar lo moldes se grafican los valores que se encontraron para cada ensayo de carga. En la Tabla I-12 se aprecian los datos de las muestras luego de la inmersión.

Tabla I-12. Datos después de sumergir las muestras.

CBR	Después de Inmersión			Unidad
Molde N°	20	15	10	-
N° Golpes / capa	10	25	56	-
Masa del agua (M_w)	48	31	36	g
Masa suelo seco (M_s)	213	182	184	g
Humedad después de Inmersión	22,5	17,0	19,6	%
Densidad Seca Compactada (γ_f)	1,40	1,45	1,48	g/cm ³

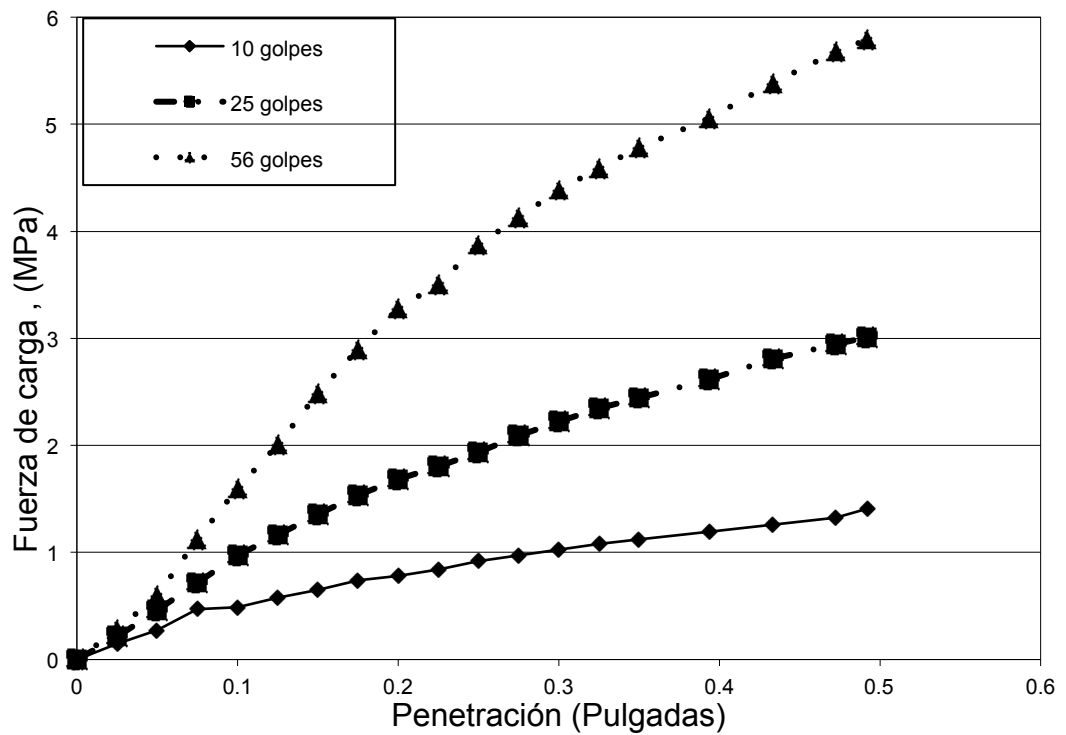


Figura I-1. Curva de penetración CBR sin corrección.

Tabla I-13. Tensión en el pistón a penetración de 0,1" y 0,2".

Penetración		Lecturas		
(pulgadas)	(mm)	Molde 20 (MPa)	Molde 15 (MPa)	Molde 10 (MPa)
0,1	2,54	0,78	1,0	1,79
0,2	5,08	1,56	2,0	3,57

Tabla I-14. Valores de CBR (%) para 0,1" y 0,2" de penetración.

CBR (%) Penetración 0.1"	11,30%	14,54%	25,88%
CBR (%) Penetración 0.2"	15,14%	19,49%	34,68%

Tabla I-15. Relación entre la densidad seca y CBR (%) .

0.1"		0.2"	
Densidad seca (KN/m ³)	CBR (%)	Densidad seca (gr/cm ³)	CBR (%)
13,7	11,30%	13,7	15,14%
14,2	14,54%	14,2	19,49%
14,5	25,88%	14,5	34,68%

El valor de CBR es 13% para una penetración de 0.1" y que el valor del CBR es 18% para la penetración de 0,2".

Estabilidad Volumétrica.

En este apartado se realiza el ensayo de expansión potencial como lo indica la norma ASTM D 4792, para comenzar se utiliza el mismo pistón que se utilizo para el ensayo Proctor, entonces se calcula la energía de compactación que genera el pistón para preparar las muestras.

$$E = \frac{N \cdot n \cdot M_p \cdot h}{V_m} \quad (7)$$

Donde

E: Energía de compactación, kgfcm/cm³.

N: Número de golpes por capa.

n: Número de capas por muestra.

M_p: Masa del pistón, gr .

V_m: Capacidad volumétrica del molde , cm³.

El porcentaje de expansión se calcula con la división de diferencia de altura que se produce en un intervalo de 24 horas y la altura total inicial de la muestra para cada molde.

$$\%_{exp} = \frac{\Delta h}{h_i} \quad (8)$$

Donde

$\%_{exp}$: Porcentaje de expansión en la probeta, %.

Δh : Diferencia de altura en 24 (h), mm.

h_i : Altura inicial de probeta, mm.

En la Tabla I-16 se indica la energía de compactación que se utilizó para preparar las muestras, estos cálculos se realizan con la ecuación (7).

Tabla I-16. Energía de compactación para ensayo de expansión volumétrica.

Energía de compactación			
	1	2	unidad
Volumen molde	2.227	2.132	cm ³
Nº de golpes	56	56	-
Masa material	3.579	3.521	g
Altura de caída	45,7	45,7	cm
Nº de capas	5	5	-
Energía de compactación	20.577	21.139	Kgfc/cm ³

La preparación de la muestra se realiza con los mismos consideraciones que se indican en la norma ASTM D1883. En la Tabla I-17 se presentan los datos de preparación y los datos que se obtuvieron al finalizar el ensayo.

Tabla I-17. Datos de la muestra antes y después de inmersión.

	Molde 1		Molde 2		Unidad
	Antes inmersión	Después inmersión	Antes inmersión	Después inmersión	
Masa molde con suelo húmedo	14.760	14.880	14.604	14.684	g
Masa molde	10.910	10.910	10.942	10.942	g
Masa de suelo húmedo	3.850	3.970	3.662	3.742	g
Masa suelo seco	3.169	3.161	3.024	3.007	g
Masa de agua	680,5	808,3	637,4	734,6	g
Humedad	21,5%	25,6%	21,1%	24,4%	%
Agua absorbida		4,1%		3,4%	%
Densidad húmeda	1,73	1,78	1,72	1,75	g/cm ³
Densidad seca	1,42	1,42	1,42	1,41	

En la Figura I-2, se grafica la temperatura en función de la cantidad de horas del ensayo, corroborando cumplir con lo que indicra la norma (70°C ±3).

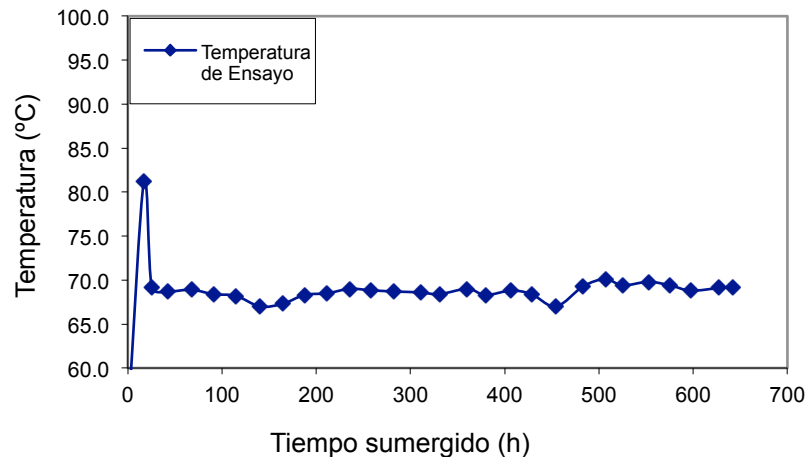


Figura I-2. Temperatura (°C) en función de horas duración ensayo (h)

Consolidación en Edómetro.

Para corroborar que durante el ensayo no se pierde masa de suelo, se calcula y compara la cantidad suelo seco que ubicó en el anillo antes de someter el suelo a cargas, y la cantidad final de suelo que se extrae desde el anillo. La ecuación a continuación nos indica como calcular la masa final de suelo en el anillo.

$$M_d = \frac{M_{Tf}}{1+W_{fp}} \quad (9)$$

Donde

M_d : Masa seca de la muestra al final del ensayo, gr.

M_{Tf} : Masa saturada de la muestra al finalizar el ensayo, gr.

W_{fp} : Contenido de humedad de la muestra, %.

Luego se calcula el contenido de agua inicial y final del ensayo.

$$W_0 = \frac{M_{T0} - M_d}{M_d} * 100 \quad (10)$$

$$W_f = \frac{M_{Tf} - M_d}{M_d} * 100 \quad (11)$$

Donde

W_0 : Contenido inicial de agua, %.

W_f : Contenido final de agua, %.

M_{T0} : Masa saturada de la muestra antes del ensayo, gr.

M_{Tf} : Masa saturada de la muestra al finalizar el ensayo, gr.

Calculo de la densidad inicial de la muestra.

$$\rho_d = \frac{M_d}{V_0} \quad (12)$$

Donde

ρ_d : Densidad seca de la muestra, gr/cm³.

V_0 : Volumen inicial de muestra, cm³.

El peso específico de la muestra se calculó con;

$$\gamma_d = 9,81 * \rho_d \quad (13)$$

Donde

γ_d : *Peso específico de la muestra, kN/m³.*

El volumen de los sólidos;

$$V_S = \frac{M_d}{G_S * \rho_w} \quad (14)$$

Donde

V_S : *Volumen de los sólidos, cm³.*

G_S : *Gravedad específica de los sólidos, número adimensional.*

ρ_w : *Densidad del agua, gr/cm³.*

Ya teniendo el valor del volumen de los sólidos podemos calcular la altura de las partículas sólidas que se encuentran en la muestra.

$$H_S = \frac{V_S}{A_a} \quad (15)$$

Donde

H_S : *Altura de los sólidos dentro del anillo, cm.*

A_a : *Área del anillo, cm².*

Para el calculo del índice de vacíos antes y al final del ensayo se utiliza la siguiente ecuación;

$$e_0 = \frac{H_0 - H_S}{H_S} \quad (16)$$

$$e_f = \frac{H_f - H_S}{H_S} \quad (17)$$

Donde

e_0 : *Índice de volumen de vacíos inicial de la muestra.*

e_f : *Índice de volumen de vacíos final de la muestra.*

H_0 : *Altura inicial de la muestra dentro del anillo, cm.*

H_f : *Altura final de la muestra dentro del anillo, cm.*

El grado de saturación de la muestra al inicio y final de el ensayo se calcula con las siguientes fórmulas;

$$S_0 = \frac{M_{T0} - M_d}{A_a * \rho_w * (H_0 - H_S)} * 100 \quad (18)$$

$$S_f = \frac{M_{Tf} - M_d}{A_a * \rho_w * (H_f - H_S)} * 100 \quad (19)$$

Donde

S_0 : *Grado de saturación inicial de la muestra.*

S_f : *Grado de saturación final de la muestra.*

Volumen específico (v) se calcula como;

$$v = e + 1 \quad (20)$$

La deformación vertical (ε) , en porcentaje se calcula con;

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_S} * 100 \quad (21)$$

Cálculo de índice de vacíos (e);

$$e = e_0 - \frac{\Delta H}{H_S} \quad (22)$$

Donde

e_0 : *Índice de volumen de vacíos inicial de la muestra*

ΔH : *Diferencia de altura en el intervalo, mm.*

$$\Delta H = h - h_0 \quad (23)$$

Donde

h : *Altura al final del ciclo carga – descarga, mm.*

ΔH : *Diferencia de altura en el intervalo, mm.*

Coeficiente de consolidación (C_v) , mediante el método de Taylor (1948);

$$C_v = \frac{0.848 \cdot H_{t90}^2}{t_{90}} \quad (24)$$

Donde

H_{t90}^2 : Mitad de la altura de la muestra luego de ocurrir el 90% de la consolidación, mm.
 t_{90} : tiempo en el cual transcurre el 90% de la consolidación en el intervalor, min.

El método de Taylor (1948) consiste en hacer una series de ajustes lineales en la grafica de ρ (mm) v/s \sqrt{t} , raíz del tiempo, (min). Se toman un numero representativo de datos iniciales en el ciclo carga/descarga seleccionado y se traza una recta, luego se traza una nueva recta que considera el mismo origen que la recta anterior, pero en su ultimo dato corresponde a 1.15 veces el valor menor en el orden de la ordenada (Y del grafico), esta nueva line intersectara en un punto la curva de consolidación y realizando un ajuste matemático se encuentra el punto (x,y), que representa en el eje "y" a la deformación en el 90% de la consolidación, y en el eje "x" el valor de t_{90} , que elevándolo al cuadrado se obtiene la cantidad de minutos que han transcurrido para el 90% de la consolidación.es así como se calcula el coeficiente de consolidación C_v .

Coeficiente de Compresión (C_c);

$$C_c = 2.3 * \lambda_0 \quad (25)$$

Donde

λ_0 : Pendiente de la linea de compresión normal.

Coeficiente de hinchamiento (C_s);

$$C_s = 2.3 * \kappa_0 \quad (26)$$

Donde

κ_0 : Pendiente de la linea de hichamiento en gráfico, v vs $\ln(\sigma'_v)$.

El ciclo de carga que se aplicara en este caso será de 12, 25, 50, 100, 200, 400, y 800 kPa, luego el ciclo de descarga será de 400, 200, 100, 50, 25 y 12 kPa. Es así como se irán calculando las diferentes variables necesarias para calcular el coeficiente de consolidación (C_v), el coeficiente de compresión (C_c) y el coeficiente de hinchamiento (C_s).

A continuación se presentan los valores obtenidos del ensayo de consolidación, los cálculos de humedad final fue realizado mediante la ecuación (11).

Tabla I-18. Datos de la muestra antes de ensayo.

Masa cápsula		7,26	g
Mat húmedo + cápsula		59,06	g
Mat seco + cápsula		54,26	g
Humedad inicial		10,21	%
Parámetros del material			
Densidad de los sólidos	Gs	2.60	-
Antes de la consolidación			
Diámetro	d	50	mm
Altura	h	19.0	mm
Masa del anillo	m_{Anillo}	2.585	g
Masa del anillo + Probeta	$m_{\text{Anillo} + \text{Probeta}}$	2.632	g
Masa suelo seco	M_d	47	g

Tabla I-19. Datos al final de ensayo.

Después de la consolidación			
Masa del anillo + Probeta húmedo	$m_{\text{Anillo} + \text{Probeta}}$	256	g
Masa del anillo + Probeta seco	$m_{\text{Anillo} + \text{Probeta}}$	230	g
Masa del anillo	m_{Anillo}	183	g
Masa saturada de suelo	M_{Tf}	73	g
Humedad final	ω_{fp}	55,3	%
Masa suelo seco	M_d	47	g

A continuación se presenta una tabla con el cálculo de índices de vacíos, volumen específico, la tensión efectiva aplicada y el modulo Edométrico (E_{ed}) para cada ciclo de carga, es necesario mencionar que las cargas se realizaron cada 3 horas, y verificando que la curva se estabilizaba y se podría realizar la siguiente carga, este mismo criterio se utilizó para los ciclos de descarga. El cálculo de índice de vacíos se fue calculando en cada intervalo de carga/descarga con la ecuación (16), y el volumen específico (20).

Tabla I-20. Cálculo de variables en ensayo de consolidación.

Intervalo, (kPa)	e	ε	E_{ed} (kPa)	C_v (m ² /s)
	1,06	-		-
12 - 25,5	1,06	0,00	3.473,00	-
25,5 - 51	1,03	0,01	1.798,15	0,298
51 - 102	0,99	0,02	3.142,99	0,162
102 - 203	0,92	0,03	2.910,63	0,253
203 - 406	0,78	0,07	2.812,15	0,658
406 - 820	0,53	0,12	3.324,58	0,701
820 - 406	0,55	0,01	3.520,48	-
406 - 203	0,58	0,01	17.196,13	-
203 - 102	0,60	0,01	10.535,65	-
102 - 51	0,61	0,01	6.561,68	-
51 - 12	0,66	0,03	1.496,06	-

A continuación se muestra la Figura I-3, indicando como se realizó el método de Taylor (1948), para la realización del cálculo el coeficiente de consolidación (C_v).

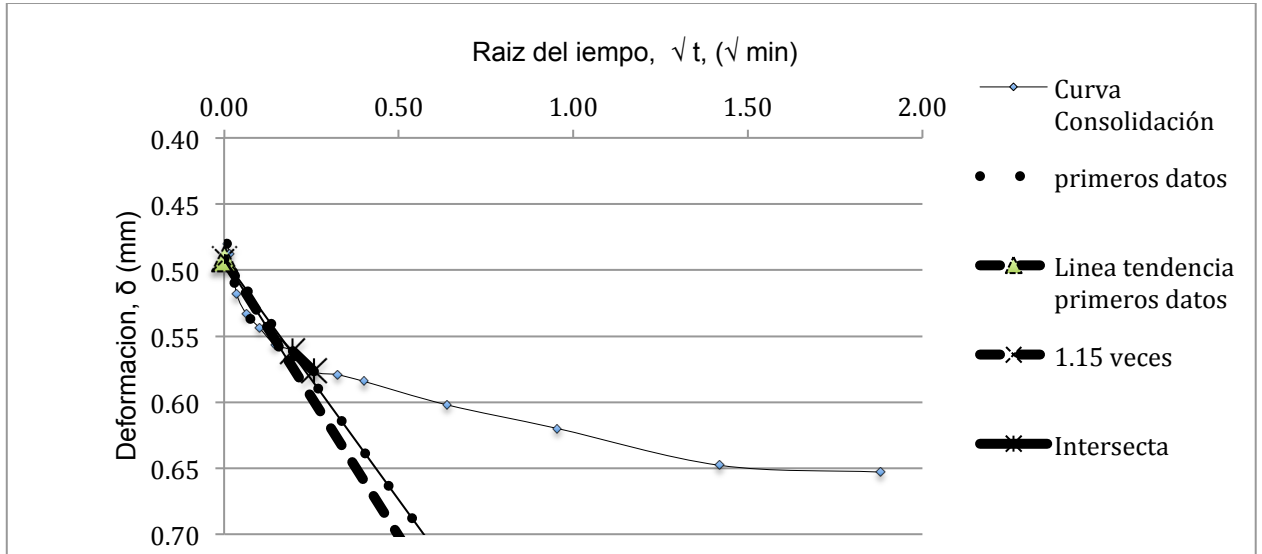


Figura I-3. Procedimiento para calcular C_v (min).

Una vez encontrada la intersección de la curva de consolidación, y la nueva línea trazada que representa 1,15 veces el menor valor de la línea en el eje de la ordenada, se realiza la intersección de rectas, como se presenta en la Tabla I-21, a continuación.

Tabla I-21. Valor de intersección de rectas.

Ecuación líneas	
$y = 0,36x + 0,49$	
$y = 0,25x + 0,51$	
entonces intersectan en	
X	Y
0.17	0.556

Entonces a partir de la Figura I-3, se obtienen los valores, que se registran en la Tabla I-22.

Tabla I-22. Variables para calculo de Coeficiente de consolidación.

Calculo de Coeficiente de Consolidación (C_v)		
Variable	Valor	Unidad
$\sqrt{t_{90}}$	0,17	min
t_{90}	0,03	min
δ_{90}	0,56	mm
δ_{100}	0,62	mm
H	9,28	mm
Finalmente		
Cv	2527,8	mm ² /min
Cv	0,253	m ² /seg
Cv	2,18x10 ⁸	mm ² /seg

Corte directo

Tabla I-23. Valores de preparación de la muestra, cálculo de humedad de preparación y calculo de humedad final del ensayo.

Corte directo ASTM D3080-90				
Carga	50	100	300	kPa
Tipo muestra	Remoldeada	Remoldeada	Remoldeada	Unidad
Saturación	30	30	30	min
Consolidación	90	90	90	min
Velocidad de Corte	0,2	0,2	0,2	mm/min
Dimensiones molde				
Alto	36	36	36	mm
Área	10	10	10	mm
Volumen Caja	360	360	360	cm ³
Masa Molde	1.618	1.618	1.618	g
Masa Molde + Suelo Húmedo	2.157	2.164	2.170	g
Suelo Húmedo	539	546	552	g
Densidad preparación	1,50	1,52	1,53	g/cm ³
Humedad de preparación				
Tara	215	103	215	g
Masa Tara + Suelo Húmedo	291	144	334	g
Masa Tara + Suelo Seco	280	138	315	g
w	16,9	17,1	19,00	%
Humedad después ensayo				
Tara	105	108	105	g
Masa Tara + Suelo Húmedo	594	634	649	g
Masa Tara + Suelo Seco	457	488	495	g
w	38,9	38,4	39,5	%

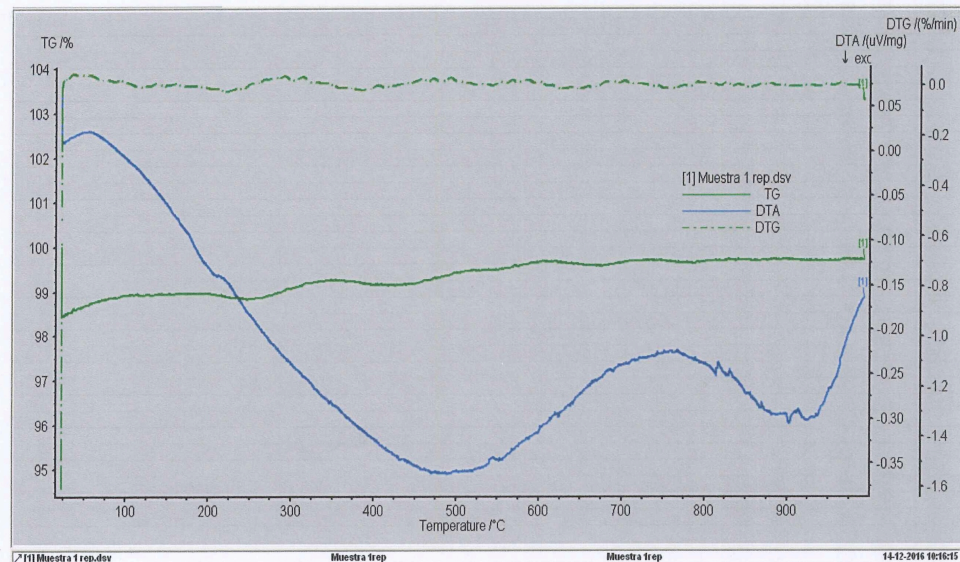
II. ANEXO. “Ensayos mineralógicos y medioambientales”

Presupuesto N°	: 2016-007
O.T. N°	: 2016-015-0
Certificado de Análisis / Ensayo N°	: 13446
Registro N°	: 16906-16909
Muestra / Material	: Escoria Blanca
Recibido de	: Jose Miguel Montenegro
	Universidad Católica de la Santísima Concepción

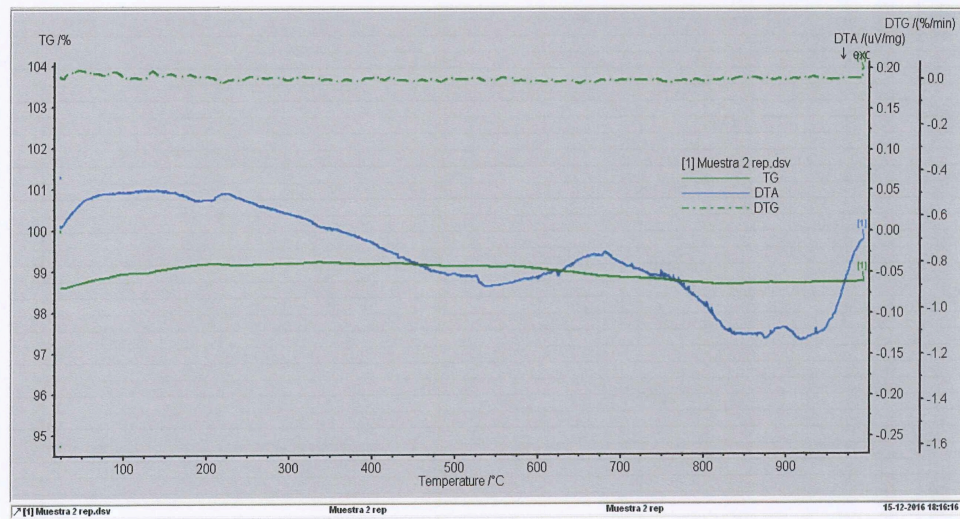
TERMOGRAVIMETRÍA (TGA)

Combustión	: Gas, Nitrógeno
Flujo de aire	: 100 ml/min
Velocidad de Calentamiento	: 5 °C/min
Temperatura	: desde temperatura ambiente hasta 1000 °C

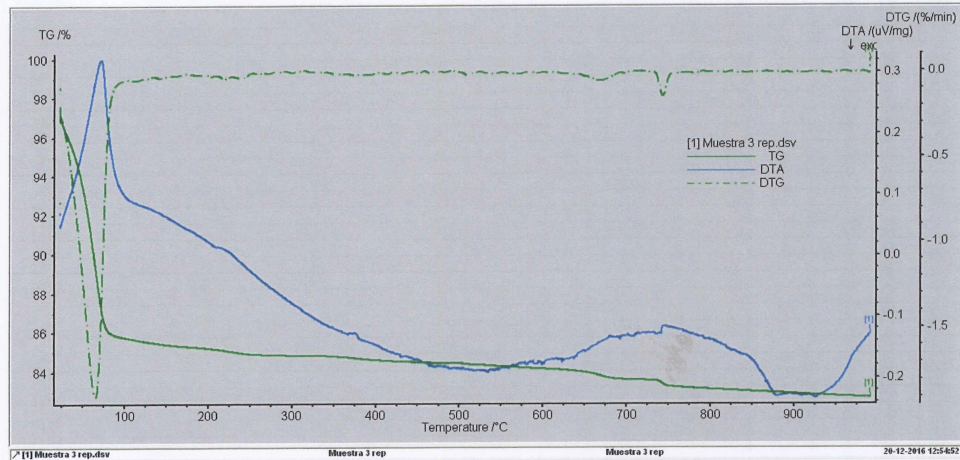
Muestra 1- muestra sin ensayar (25/10/2016)



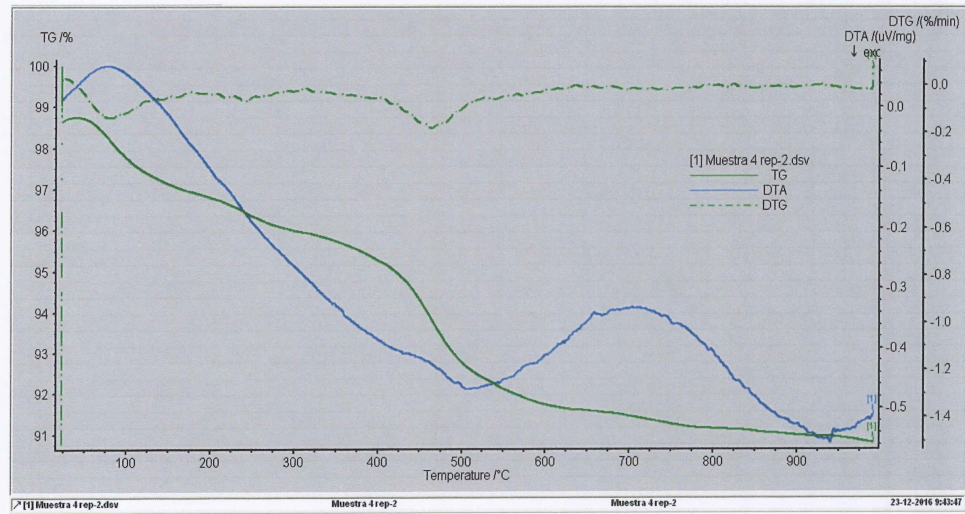
Muestra 2-muestra sin ensayar (25/10/2016)



Muestra 3- E.P. (25/10/2016)



Muestra 4- suelo D.L (29/10/2016)



Valor : 6 UF + IVA


 Ximena García C.
 Jefe Análisis/ Ensayo




 Alfredo L. Gordon S.
 Director Departamento

Nota: Ningún certificado es válido sin la firma del Director del Departamento. Las muestras permanecen tres meses en el archivo.

INFORME ANALISIS QUIMICO
SQC-38737
AREA CONTAMINANTES – Santiago

Solicitante : UNIVERSIDAD CATOLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION
 Atención Sr. : Jose Montenegro Orden de Trabajo: 451968
 Dirección : Alonso de Rivera N° 2850 –Concepción Fecha de Emisión: 07.03.2017

1.- ANTECEDENTES GENERALES

Fecha de Recepción : 09.02.2017
 Cantidad de Muestras : Dos (02)
 Tipo de Muestras : RIS
 Proporcionadas por : UNIVERSIDAD CATOLICA DE LA SANTISIMA
 CONCEPCION., según Cotización N° SQC-334271/2016.
 Fecha de Ejecución de Análisis: 09 de Febrero a 06 de Marzo 2017
 Fecha Término Análisis : 07.03.2017

2.- METODOS DE ENSAYO

2.1.- NCh 2754. Of. 2003 (Test TCLP - EPA 1311)

Residuos-Procedimiento de lixiviación para determinar movilidad de analitos tóxicos orgánicos e inorgánicos.

Esta norma se aplica a la determinación de la concentración de ciertos metales que pueden ser lixiviados en forma natural, de acuerdo con las condiciones ambientales del lugar de almacenamiento de un residuo sólido. Esta norma se aplica a suelos expuestos y no expuestos, a residuos o desechos masivos, desechos o sedimentos, sólidos y/o líquidos, provenientes de operaciones mineras o industriales.

2.1.1.- Elementos de Toxicidad Características (Compuestos Inorgánicos) TEST TCLP

ENSAYO	MÉTODO	LIMITE DETECCION mg/L
Prep. y Extracción	NCh 2754	----
Plomo	Abs. Atómica	0,2
Cadmio	Abs. Atómica	0,05
Mercurio	A.A./Vapor Frío	0,02
Cromo	Abs. Atómica	0,2
Bario	Abs. Atómica	0,5
Selenio	Abs. Atómica / Generación de Hidruros	0,2
Arsénico	Abs. Atómica	0,1
Plata	Abs. Atómica	0,2

SQC-38737

Fecha de Emisión: 07.03.2017

3.- IDENTIFICACION DE MUESTRAS

Identificación de Muestra	Descripción
M-1	Muestra de Suelo 17/01/2017
M-2	Muestra de Escoria 17/01/2017

4.- RESULTADOS

4.1.- Toxicidad Extrínseca

4.1.1.- Test TCLP Inorgánico

Identificación Muestra	Plomo	Cadmio	Mercurio	Cromo	Bario	Selenio	Arsénico	Plata
	mg/L							
M-1	<0,2 ^(*)	0,2	<0,02 ^(*)	<0,2 ^(*)	<0,5 ^(*)	0,2	<0,1 ^(*)	<0,2 ^(*)
M-2	0,2	0,3	<0,02 ^(*)	<0,2 ^(*)	<0,5 ^(*)	<0,2 ^(*)	<0,1 ^(*)	<0,2 ^(*)
CMP^(**) D.S: 148	5,0	1,0	0,2	5,0	100,0	1,0	5,0	5,0

(*) Valor se encuentra bajo el Límite de Cuantificación.

(**) CMP: Concentración Máxima Permisible.

NOTA: Los resultados obtenidos son validos sólo para la muestra analizada, la cual fue proporcionada e identificada por el Solicitante.

DENISSE JARA ROA.
Supervisor Laboratorio
Contaminantes