

CARACTERIZACIÓN DE UN SUELO ARCILLOSO Y SU MEZCLA CON ESCORIA BLANCA PROVENIENTE DE LA SIDERURGIA INTEGRAL.

Daniel Leiva Vidal¹, José Montenegro Cooper² y Roberto Ponce Abarca³

RESUMEN:

Las escorias son un subproducto generado durante la fabricación de acero, las que se originan de acuerdo con la etapa del proceso sobre el cual se generan. La escoria blanca o también denominada Ladle Furnace Slag (LFS), se forma durante el afino de la colada el cual se lleva a cabo en el horno de cuchara. En la presente investigación se evaluó el comportamiento de la escoria blanca utilizada como estabilizador químico de un suelo arcilloso para evaluar su potencial uso en obras viales en comparativa a las mejoras generadas por un estabilizador tradicional común, tal como lo es la cal apagada. Este estudio se divide en la caracterización química (XRF), mineralógica (XRD y TG/DTA), medioambiental (toxicidad mediante TCLP) y geotécnica (caracterización, compactación, variación volumétrica y propiedades resistentes). Los resultados obtenidos son adecuados, desde un punto de vista medioambiental, dado que la escoria blanca LFS estudiada no es considerada contaminante ni adiciona al suelo metales pesados en una tasa superior a los indicados por el Decreto Supremo N° 148. La caracterización geotécnica de las mezclas suelo-escoria reduce la plasticidad con respecto a la del suelo, aumenta su CBR y no presentó colapso ni hinchamiento libre (tanto el suelo como las mezclas). Por tanto, la utilización de escoria blanca en aplicaciones de obras viales traería consigo una alternativa para su reutilización sostenible y posiblemente una reducción de las grandes cantidades del material inutilizado y almacenado en centros de acopio.

PALABRAS CLAVES: Escoria; Mezclas; Mejoramiento suelos.

ABSTRACT:

Slags are a byproduct generated during the manufacture of steel, which are classified according to the stage of the process on which they are generated. The white slag or also called, Ladle Furnace Slag (LFS), is emanated during the refinement of the colada which is carried out in the spoon oven. In the present investigation, the behavior of the white slag used as chemical stabilizer of a clay soil was estimated to evaluate its potential use in roadworks compared to the improvements generated by a traditional stabilizer, such as the slaked lime. This study is divided into: chemical characterization (XRF), mineralogical (XRD and TG / DTA), environmental (TCLP) and geotechnical characterization (characterization, compaction, volumetric variation and resistant properties). The results obtained are appropriate from an environmental point of view since the LFS white slag studied is not considered contaminant nor add to the soil heavy metals at a rate higher than those indicated by the Supreme Decree No. 148. The geotechnical characterization of the mixtures Soil-slag reduces plasticity with respect to soil, increases its CBR and it did not present collapse or free swelling (both soil and mixtures). Therefore, the use of white slag in road works applications would bring with it an alternative for its sustainable reuse and possibly a reduction of the large quantities of the material unused and stored in storage centers.

KEYWORDS: Slag; Mixtures; Soil improvement.

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, deleiva@ing.ucsc.cl

² Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, jmontenegro@ucsc.cl

³ Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, rponce@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

El suelo es la capa superficial de la corteza terrestre compuesta de minerales y partículas orgánicas sobre la cual se desarrolla la vida en el planeta, dando origen a formaciones vegetales, nutrientes, influencia en el clima, favorecer las corrientes de agua y fundamentalmente es el soporte de las civilizaciones y sus construcciones.

Los efectos naturales y eventual desintegración a la cual es sometida la roca madre conducen al desarrollo de diferentes perfiles o tipos de suelos. Estos pueden variar según la forma, tamaño y distribución de partículas, composición mineral, contenido de humedad, entre otros factores. Los suelos en obras viales, específicamente en composición de bases, sub-bases y terraplenes, pueden tomar la clasificación de aptos y no aptos para la construcción, criterio basado según sus propiedades de plasticidad, compactación, capacidad portante, resistencia y variación volumétrica, entre las más importantes.

En la actualidad, existen varios criterios para evaluar las características geotécnicas de un suelo para que éste sea empleado como material de apoyo o relleno en la construcción de una obra de carretera, siendo los documentos más empleados en nuestro país el Manual de Carreteras, redactado por el Ministerio de Obras Publicas de Chile. Existen además otros documentos internacionales tales como el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (España) o la “Direction des Routes et de la Circulation Routiere, 1981” (Francia). En general, los documentos antes señalados coinciden en efectuar varios ensayos geotécnicos para evaluar la conveniencia de utilizar un material, destacándose entre ellos la granulometría, plasticidad, hinchamiento libre, colapso, Proctor, Densidad Relativa, California Bearing Ratio (CBR) y contenidos de materia orgánica, yesos y sales solubles, entre otros.

Es necesario conocer las siguientes propiedades de los suelos antes de tomar una decisión: distribución del tamaño de sus partículas (granulometría), plasticidad (límites de Atterberg), compactación (Proctor y/o densidad relativa), capacidad portante (CBR) y estabilidad volumétrica (hinchamiento libre y colapso), así como ciertas cuestiones químicas (contenidos de sulfatos solubles, yesos, sales solubles y materia orgánica). El suelo empleado en la presente investigación empleará suelos principalmente arcillosos, los que usualmente son llevados a botadero durante la construcción de una carretera, debido a sus regulares a bajas propiedades geotécnicas.

Las arcillas están compuestas por partículas con una extensa superficie y forma laminar, las cuales en estado natural suelen encontrarse cargadas negativamente debido a la sustitución de átomos de silicio o aluminio de su estructura básica por otros de menor valencia positiva, así como la rotura de enlaces de borde de las láminas (Jiménez-Salas y de Justo Alpañez, 1975). Esto genera atracción entre sus moléculas dipolares u otros cationes, para conseguir su estabilidad química, dando origen a una doble capa difusa de partículas (ver Figura 1).

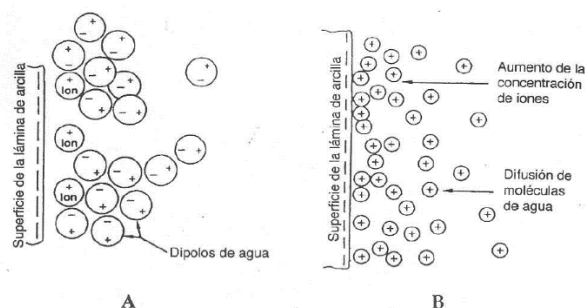


Figura 1: Capa doble difusa de las partículas de arcilla

Fuente: Ortuño y Rodríguez 2000 tomada de Little, D.N: op cit

Por tanto, las arcillas se encuentran en una constante búsqueda de un equilibrio más eficiente en su capa difusa. Estas suelen sustituir los cationes alojados en la capa doble por iones de calcio, dado en los cationes divalentes de calcio pueden reemplazar a otros cationes de menor valencia o a los que siendo de igual valencia tienen menor tamaño (Ortuño y Rodríguez, 2000). Dado que las arcillas se componen principalmente de silicatos de

aluminio, éstas al ser estabilizadas por cationes cálcicos (presentes en escorias LFS), generan una excelente “materia prima puzolanicas” para conseguir un conglomerante.

En la búsqueda de soluciones para la mejora de suelos arcillosos, varios investigadores estudiaron añadir estabilizadores químicos (los cuales deben garantizar al menos los elementos necesarios para la reacción puzolanicas). Las principales propiedades se mejoran en un ámbito químico y geotécnico. Entre las adiciones tradicionales más utilizadas podemos encontrar cementos y cales. Asimismo, y según recientes estudios de investigadores, han demostrado la existencia de otros materiales no tradicionales los cuales también pueden presentar propiedades cementantes e incluso añadirle propiedades superiores a las de los materiales tradicionales. Es así como a estos últimos materiales se les da un valor agregado, tal como ocurre con el caso de las escorias de acerería, subproducto de la fabricación del acero.

El acero es un material con una elevada demanda a nivel mundial, debido a sus propiedades de resistencia y ductilidad. La fabricación de este material se realiza en grandes industrias, las cuales en base a óxidos y carbonatos dan producto a esta aleación (Apraiz, 1984). A las empresas que manufacturan este material se les denomina siderúrgicas, siendo actualmente dos tipos los más empleados: la siderurgia integral (SI) y la siderurgia eléctrica (SE). La diferencia entre la primera y la segunda corresponde a la materia prima empleada (arrabio obtenido a partir de mineral hierro y acero reciclado, respectivamente).

El proceso comienza con i) preparación de la materia prima (SI: horno alto), ii) oxidación (SI: convertidor al oxígeno y SE: horno eléctrico) y afino (SI y SE: horno cuchara). A continuación, se resumirá el proceso de fabricación de acero con cada uno de los métodos indicado anteriormente y comenzando por el de la siderurgia integral, siguiendo por la siderurgia eléctrica y finalizando con el proceso de afino (prácticamente idéntico en ambas siderurgias). A continuación, se inicia con la siderurgia integral:

i) **Horno alto:** cápsula cilíndrica de acero recubierta interiormente por material refractario en el que se introduce la materia prima (mineral de hierro), combustible (carbón coque) y un fundente formador de escoria (piedra caliza) (ver Figura 2). Al descender los materiales acopiados en el horno, se incrementa su temperatura lentamente. Aproximadamente a los 1.800 °C se produce la reducción del óxido de hierro (FeO), es decir, la separación en dos elementos independientes: hierro (Fe) y oxígeno (O), formando arrabio: aleación de óxido de hierro con bajos porcentajes de carbono (C) (entre 3 a 4 %). Cerca del fondo del horno alto, se encuentra un orificio por el cual fluye el arrabio, y por sobre éste, una abertura por la cual se extrae la escoria de horno alto (Blast Furnace Slag, BFS). Por cada tonelada de acero fabricado se generan cerca de 200 a 250 kg de esta escoria (Shi, 2004).

ii) **Convertidor al oxígeno (LD):** horno con forma de barril abierto en su parte superior, y recubierto interiormente con material refractario de pH básico (ver Figura 3). La finalidad de la fase es reducir el contenido de carbono (C) de la colada, hasta alcanzar valores inferiores al 1%. Al interior de este horno, se introduce arrabio, chatarra y fundentes, aportándose el oxígeno presurizado mediante una lanza. La elevada temperatura del arrabio líquido, así como la gran agitación producida por la inyección del oxígeno, contribuyen a que se produzca una rápida oxidación del carbono, silicio, manganeso y fósforo, combinándose los óxidos de estos elementos con los fundentes agregados al iniciarse el soplado de oxígeno para formar la escoria en estado líquido (Basic Oxygen Furnace, BOF) la cual flota en la superficie del baño de acero. Por cada tonelada de acero fabricado se generan entre 80 y 120 kg de esta escoria. (Shi, 2004).

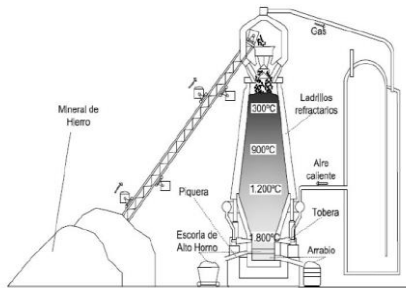


Figura 2: Fase Alto Horno de la siderurgia
 Fuente: Montenegro (2012)

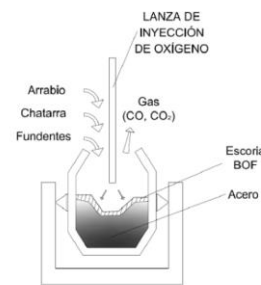


Figura 3: Convertidor al oxígeno
 Fuente: Montenegro (2012) de adaptación de Shi (2004)

La siderurgia eléctrica utiliza chatarra como la principal materia prima en la fabricación de acero, la que habitualmente clasificada en tres tipos (Fruehan, 1998): Chatarra recuperada u obsoleta, industrial, “de la casa” según denominación consolidada en el sector.

ii) Horno de arco eléctrico: compuesto por una cuba y una bóveda revestidos interiormente con material refractario y en la parte superior por 3 electrodos de grafito (ver Figura 4). Al interior del horno se agrega la chatarra, más adición de fundentes, los cuales son responsables de la formación de escoria de arco eléctrico (Electric Arc Furnace, EAF) (Apraiz, 1984). En el proceso de fusión, la electricidad pasa por los electrodos a un elevado voltaje, generando un arco eléctrico, lo que, junto al ligero soplado de oxígeno, produce la oxidación del hierro, sílice, fósforo, manganeso y carbono. Todos los elementos anteriores son eliminados en la colada del acero combinándose con la cal añadida (Apraiz, 1984). Por cada tonelada de acero fabricado se generan entre 110 a 115 kg de esta escoria.

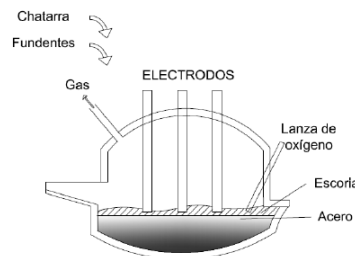


Figura 4: Fase horno de Arco eléctrico
 Fuente: Shi (2003) y Montenegro (2012)

iii) Afinado de la colada: proceso de desoxidación y desulfuración sobre el cual se define el tipo de acero que se fabrica. Los aceros habitualmente manufacturados son común, especial, e inoxidable. Esta fase se realiza en un horno de cuchara, el cual está compuesto por una cuba revestida interiormente por material refractario, abierta en su parte superior (ver Figura 5). La colada entra al horno con un elevado grado de oxidación, añadiéndose para su protección, elementos formadores de una escoria reductora, tales como cal, espato flúor y carbón de coque o grafito (Apraiz, 1984; Fruehan, 1998; IHOBE, 2000). Al entrar en contacto, la escoria se oxida mientras que la colada de acero se reduce. Se añaden diferentes ferroaleaciones y otros productos con la finalidad de ajustar la combinación química deseada, así como para eliminar sus impurezas. La masa sólida que flota encima de la colada se denomina escoria de horno cuchara (Ladle Furnace Slag, LFS) o escoria blanca. Por cada tonelada de acero fabricado se generan entre 20 a 30 kg de esta escoria.

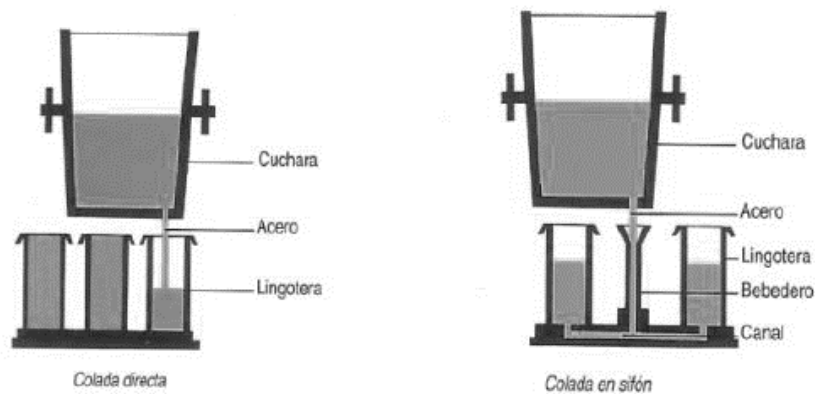


Figura 5: Fase horno de cuchara

Fuente: www.imh.eus

En general, la coloración de una escoria es indicativa de su grado de oxidación. El color negro de la escoria de horno eléctrico advierte su elevado grado de oxidación, mientras que el blanco de la de horno cuchara indica que se encuentra totalmente reducida o desoxidada. Tonalidades intermedias, representan grados de oxidación comprendidos entre el máximo de la escoria negra, y el mínimo de la blanca (Apraiz, 1984)

Las escorias de acerería en tiempos pasados fueron catalogadas como un desecho de la producción del acero, pero debido a sus múltiples utilidades en obras civiles, han sido clasificadas ahora como un subproducto de la industria siderúrgica (Koros, 2003). La utilización y valorización de este material, propone un compromiso y un llamado a la conciencia, acerca del cuidado del medioambiente disminuyendo la actividad extractiva de árido natural, evitando el agotamiento de recursos naturales y contribuyendo a la conservación del entorno, recuperación de espacios degradados y a un desarrollo sostenible reduciendo los niveles de contaminación y emanación de gases del efecto invernadero. A su vez la utilización de la escoria conllevaría un beneficio económico a las empresas en la implementación de un nuevo mercado y nuevos puestos de investigación y trabajo. En la actualidad un alto porcentaje de escorias se encuentran almacenados sin utilidad en extensos centros de acopio, significando un problema para las compañías siderúrgicas y ocasionando un desaprovechamiento de áreas en las que se podrían llevar a cabo otras actividades productivas.

En Chile existen dos tipos de plantas de fabricación de acero, la siderúrgica integral (Compañía de Acero del Pacífico, CAP; Concepción, Chile), y la siderúrgica eléctrica (Gerdau AZA; Santiago, Chile), las cuales el año 2016 generaron una producción de más de 1.153.000 toneladas de acero, lo cual se traduce en aproximadamente 500.000 toneladas de escorias al año, de las cuales aproximadamente un 70% provienen de la planta CAP, Concepción (ver Figura 6) (cifras según de la World Steel Asociación).



Figura 6: Escoria de Acerería, CAP

Fuente: Elaboración propia, Laboratorio Geotecnia-UCSC.

Según recopilación recogida de diversos investigadores, se ha establecido que los subproductos pueden presentar propiedades superiores a las de los materiales tradicionales, o darles a estos un valor agregado como es el caso de las escorias de acerería. Tenemos el caso del cemento siderúrgico (clinker de cemento portland con adición de escorias de horno alto (BFS)), que presenta un mejor comportamiento en ambientes corrosivos y marinos que el del cemento Portland (Hewlet, 1998, Callster 2002). También es conocida la mayor resistencia mecánica y a la abrasión de las escorias negras (EAF) y las de convertidor de oxígeno (BOF) en comparación con la de una grava o arena de origen silicio o calizo, al ser utilizado como áridos para la construcción de pavimentos o en capas inferiores (IHOBE, 1999).

Las escorias presentan un elevado número de usos, destacándose en el área de la ingeniería civil, en la fabricación de adocretos de hormigón (Nazer et al. 2013), bases, sub-bases y pavimentos (Manso et al. 2005, IHOBE 1999, San-José Lombera et al. 2001, San José et al. 2007, Pasetto y Baldo 2013, Ortega-Lopez 2011), estabilización de suelos (Manso et al. 1005), terraplenes (Montenegro et al. 2013, Montenegro 2013, Kanagawa y Kuwayama 1997), hormigón y morteros (Proske et al. 2013, Manso et al. 2004, Manso et al. 2006, Manso et al. 2011, Palando et al. 2011, Rodríguez et al. 2009, Abu-Eishah et al. 2012, Pellegrino et al. 2013, Anastasiou et al. 2014), materia prima y adición del cemento (Müller y Harnisch 2008, Hewlet 1998, Orizola 2006).

La presente investigación busca estudiar los efectos/beneficios generados en una arcilla, frente a la adición de escoria blancas de acerería (LFS), bajo la comparación de las mejoras producidas por un estabilizador de suelos tradicional como es la cal apagada.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, se describe la preparación y/o descripción de cada uno de los materiales y posteriormente se detallan las normas y procedimientos empleados en la realización de los ensayos.

2.1 MATERIALES

La presente investigación utiliza: i) suelo arcilloso, ii) escoria blanca de siderurgia integral, y iii) cal apagada. La investigación propone estudiar el comportamiento del suelo solo, así como añadiéndole a este, dos porcentajes de escoria y uno de cal.

2.1.1 Suelo

El suelo corresponde a una arcilla blanda con propiedades no aptas para conformar rellenos o terraplenes en obras viales. El material fue extraído desde el loteo San José del Mar, ubicado en el sector Quebrada Honda de Tomé, provincia de Concepción, Chile.

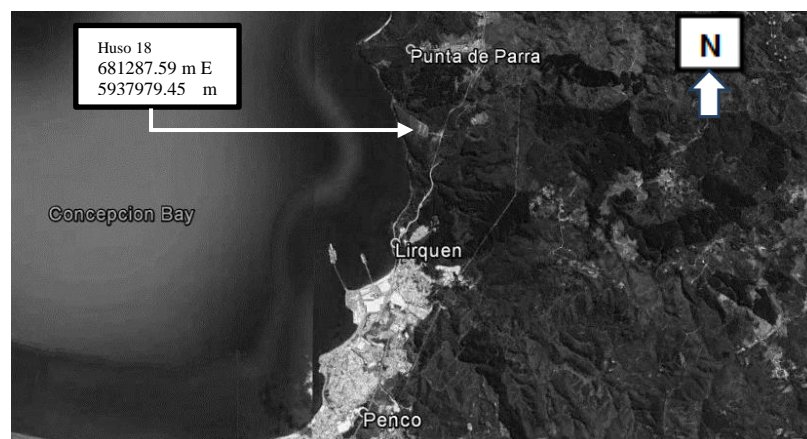


Figura 7: Zona en la que se recolectó la muestra de suelo.

Fuente: Google Earth 2017

El suelo ha sido secado en el horno a una temperatura de 110 ± 5 °C durante 24 horas, para realizar una posterior pulverización de los terrones mediante mazo de goma, para llevar las partículas a su tamaño y forma original.

Dado que el procedimiento anteriormente citado es demasiado lento y engorroso, para conseguir la cantidad necesaria para la realización de todos los ensayos, es que se optó por introducir el suelo seco en el interior de la máquina de los Ángeles para emplear sus esferas de acero (diámetro 47 mm. y masa de 400 g), alcanzando excelentes resultados.

Cabe señalar que este último procedimiento fue utilizado, dado que el material en estudio presenta un tamaño máximo inferior a 1,00 mm y un porcentaje de finos por encima del 60%, en muestras ensayadas con el procedimiento del mazo de goma.

2.1.2 Escoria

La escoria horno de cuchara (LFS), también denominada escoria blanca de acerería fue entregada al grupo de investigación por la Compañía de Aceros del Pacifico (CAP). La escoria LFS utilizada en la presente investigación corresponde a la misma muestra que fue utilizada por Caballero (2016) en su investigación “*Caracterización de la Escoria Blanca Proveniente de la Siderurgia Integral*”. Por tanto, se continuó el procedimiento de preparación descrito por el citado autor y los resultados de su caracterización pueden ser encontradas en su investigación.

2.1.3 Cal

La cal utilizada en la investigación corresponde a cal hidráulica apagada, la cual cumple con los requisitos exigidos por las normas NCh 1928 y NCh 2256/1. La principal diferencia que presenta la cal hidráulica artificial con la natural es el contenido de óxido de calcio libre (CaO), donde en el caso de las cales artificiales este compuesto se presenta en un requisito del 8%, mientras que en caso de las cales naturales en un 23%.

2.1.4 Mezclas: suelo/escoria y suelo/cal

Las mezclas estudiadas corresponden a tres: dos a las que al suelo se le añadió escoria (5 y 10 %) y una a la que se le agregó cal apagada (1 %). Cabe señalar que el porcentaje de estabilizador químico añadido corresponde a la porción de peso seco de suelo. Las mezclas suelo/escoria y suelo/cal fueron efectuadas en máquina mezcladora –usualmente para morteros- durante un tiempo de 10 minutos. Con este procedimiento se asegura una suficiente y adecuada homogeneidad y representatividad de las mezclas.

La Tabla 1 muestra la notación dada al suelo arcilloso (mezcla 0) como a las mezclas de éste con un 5 y 10 % de escoria (mezclas 1 y mezcla 2, respectivamente), así como al que se le agrega un 1% de cal apagada (mezcla 3).

Tabla 1. Porcentaje en peso seco de cada material que compone la mezcla, así como la notación.

Fuente: Elaboración propia

Notación	Porcentaje en peso seco de cada mezcla (%)		
	Suelo	Escoria	Cal
Mezcla 0	100		
Mezcla 1	95	5	
Mezcla 2	90	10	
Mezcla 3	99		1

2.2 Caracterización química y mineralógica

2.2.1 Fluorescencia de rayos X (XRF)

La fluorescencia de rayos X (XRF) tiene como finalidad determinar en un material el porcentaje de cada uno de los elementos que lo componen. La radiación de rayos X expulsa electrones a las capas interiores del átomo. Los electrones de las capas más externas ocupan los lugares vacantes, el exceso energético resultante de esta transición se disipa en forma de fotones o radiación X fluorescente, con una longitud de onda característica, también denominada espectro XRF.

Este ensayo XRF realizado a la escoria LFS fue desarrollado por el laboratorio de la compañía siderúrgica CAP, Concepción mediante el equipo marca Rigaku Modelo ZSX Primus II.

La muestra ha sido preparada según las condiciones indicada anteriormente y entregada a la citada empresa para la realización de este ensayo.

2.2.2 Difracción de rayos X (XRD)

La difracción de rayos X (XRD) tiene como finalidad determinar la composición mineralógica presente en un material. Este método se basa en el análisis en las interferencias ópticas producidas en las ondas de rayos X con la colisión de los átomos presentes en la muestra, las cuales 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, produzcan una superposición (interferencia) con la radiación de los átomos de la muestra (Ziegert, 2011).

El ensayo XRD fue realizado en el Instituto GEA, Universidad de Concepción, mediante el equipo Bruker modelo D4, bajo los siguientes parámetros:

Longitud de onda (λ): 1,541
Barrido angular entre 2θ desde 3° hasta 80°
Intervalo de medición: $0,02^\circ$.
Tiempo de detección por intervalo: 141 segundos.

El ensayo se realizó a una muestra de arcilla y de escoria blanca (LFS).

2.2.3 Termogravimetría con análisis térmico diferencial (TG/DTA)

La termogravimetría con análisis térmico diferencia (TG/DTA) ha sido efectuada con la finalidad de determinar la composición mineralógica de los materiales unitarios. Este ensayo está basado en la medida de variación de masa de una muestra cuando se incrementa la temperatura a velocidad de calentamiento controlada. A partir del ensayo se obtienen las siguientes tres curvas (cada una de ellas en un eje de ordenada diferente) con respecto a la temperatura (abscisa): i) porcentaje de masa con respecto a la inicial, ii) derivada de la pérdida de masa, y iii) diferencia de temperatura de la muestra ensayada con respecto a la patrón. La pérdida de masa de la muestra se produce a medida que aumenta la temperatura en el horno debido a deshidrataciones o descarbonataciones, oxidaciones o cambios de minerales, reacciones endotérmicas o exotérmicas. Analizando de las reacciones que se producen durante el ensayo, se pueden detectar y cuantificar la cantidad de ciertos minerales. El ensayo se realizó a la muestra de arcilla y a la escoria blanca de acerería.

Este ensayo ha sido efectuado por el Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad de Concepción, empleando el equipo Netzsch, modelo STA 409 PG Luxx, bajo los siguientes parámetros:

Gas: Nitrógeno.
Flujo de aire: 100 ml/min.
Velocidad de calentamiento: $5^\circ\text{C}/\text{min}$.
Temperatura máxima de ensayo: 1000°C .

2.3 Caracterización medioambiental

La caracterización medioambiental ha sido realizada mediante ensayo de lixiviación TCLP, para cumplir con los requerimientos de toxicidad según la normativa vigente.

2.3.1 Lixiviación (TCLP)

El ensayo de lixiviación ha sido efectuado con el fin de determinar la concentración de ciertos metales que pueden ser lixiviados. Según la norma NCh 2754 Of. 2003 (Test TCLP – EPA 1311) este ensayo aplica a suelos expuestos y no expuestos, a residuos, sedimentos o desechos masivos y solidos y/o líquidos, provenientes de operaciones mineras e industriales.

El Decreto Supremo N° 148 del año 2003 redactado por el Ministerio de Salud del gobierno de Chile, el cual se titula “Reglamento Sanitario Sobre el Manejo de Residuos Peligros” estipula los contenidos máximos de metales pesados permitidos que un material y/o residuo puede alcanzar para no ser catalogado como residuo peligroso. (Ver Tabla 2)

La caracterización medioambiental, poniendo especial énfasis en la toxicidad, ha sido efectuada a dos materiales unitarios: arcilla y escoria (LFS).

Tabla 2: Concentraciones Máximas Permisibles de los ensayos efectuados

Fuente: Decreto N° 148 de 2003.

Sustancia	CMP (mg/l)
Plomo	5,0
Cadmio	1,0
Mercurio	0,2
Cromo	5,0
Bario	100,0
Selenio	1,0
Arsénico	5,0
Plata	5,0

2.4 Caracterización geotécnica

2.4.1 Identificación del material

La identificación del material se ha realizado efectuando los ensayos de granulometría, plasticidad y gravedad específica.

La granulometría se ha efectuado siguiendo el procedimiento de la norma ASTM D 422. Se toman 500 g de suelo seco (en horno a 110 °C por 24 horas) que pasen la malla #4 (N° 4 (4,75 mm) y se procede a lavarlos por la malla #200. El material que queda retenido en la malla se seca en horno y se criba por tamices: N° 10 (2,00 mm); N° 20 (0,85 mm); N° 40 (0,425 mm); N° 60 (0,25 mm); N° 100 (0,15 mm); N° 200 (0,075 mm), mediante un vibrador de tamices mecanizado durante un tiempo de 10 minutos.

La plasticidad se determina mediante los límites líquidos y plásticos, siguiendo la norma ASTM D 4318. Este ensayo aplica a las mezclas: M0, M1, M2 y M3, con material tamizado por la malla N° 40 (0,4 mm). Según previas investigaciones (Caballero, 2016), la escoria blanca LFS no presenta plasticidad.

Se humecta la mezcla 0 con agua destilada hasta formar una pasta de consistencia homogénea, y se deja reposar durante 24 horas. El límite líquido se determina mediante la cuchara de Casagrande y el límite plástico a través de los bastones.

La gravedad específica (Gs) se ha efectuado siguiendo la metodología de las normas ASTM D 5550 y NCh 1516 Of. 79. La muestra se tamiza por la malla N° 4 (4,75 mm) y se seca en el horno (110°C durante 24 horas) previo al ensayo. Se introduce una muestra (aproximadamente 100 g) a un picnómetro limpio y seco. Se agrega agua destilada al picnómetro hasta que toda la muestra quede sumergida. Se conecta la boca del matraz a una bomba de vacío durante 15 minutos (según NCh 1516), con la finalidad de quitar todo el aire atrapado. Posteriormente, se agrega agua hasta la marca de calibración del picnómetro. Se registra la masa del picnómetro + suelo + agua hasta la marca de calibración, la cual es comparada con la masa del picnómetro + agua hasta la marca de calibración. El ensayo se realiza considerando una temperatura ambiente de 20 °C.

2.4.2 Propiedades de compactación

Las propiedades de compactación han sido medidas mediante ensayos Proctor y CBR. En los siguientes párrafos se describe el procedimiento seguido en cada uno de ellos.

El ensayo Proctor modificado se ha realizado según norma ASTM D 1557 y NCh 1534/II Of. 79. Para cada una de las cuatro mezclas (M0, M1, M2, M3) se preparan cinco muestras con distintos porcentajes de humedad con el objeto de obtener un punto densidad/humedad cercano a la DMCS, dos por encima de éste y otros dos por debajo.

En el molde de compactación recomendado por la norma se introduce el suelo en 5 capas de igual masa. El suelo es compactado por un pisón de 4,5 kg el cual cae libremente desde una altura de 460 mm a través de 25 golpes. Terminado la etapa de compactación, se enrasa el material excedente de la superficie para registrar la masa suelo compactado dentro del volumen de control (constante). De cada una de las muestras compactadas se obtienen dos muestras, desde el centro de la probeta, las cuales se ingresan al horno por 24 hrs a una temperatura de 110 °C, para determinar su porcentaje de humedad.

En el ensayo Proctor modificado, cada punto ensayado contiene una humedad propia, a la cual se le asocia un valor único de densidad seca. A través de un ajuste parabólico, en la función generada por los puntos de densidad seca y humedad, podemos encontrar en el valor máximo de la curva la densidad máxima compactada seca (DMCS) y su respectiva humedad asociada denominada humedad óptima.

La capacidad de soporte del suelo (CBR) ha sido determinada mediante la norma ASTM D 1883. Para cada una de las 4 mezclas (M0, M1, M2, M3) se fabricaron tres probetas con distintos niveles de compactación: 10, 25 y 56 golpes por capa de un total de cinco, fabricadas con sus respectivas humedades óptimas determinadas en el ensayo Proctor modificado.

Las probetas son completamente sumergidas en un estanque con agua a temperatura ambiente durante 96 horas, período de tiempo en el cual se mide con un deformímetro el cambio volumétrico (hinchamiento) que presenta. Esta condición pretende simular el caso más desfavorable al cual puede ser sometido el suelo en condiciones naturales. Transcurrido este proceso, se procede a la penetración de las probetas en una prensa. Se ajusta una velocidad controlada de avance de 1,25 mm/min, la cual aplica la fuerza sobre la probeta a través de un pistón de área circular (19,65 cm²) hasta obtener a una penetración de 12,5 mm.

2.4.3 Variación volumétrica

Es relevante determinar la variación volumétrica que se produce en las mezclas cuando éstas entran en contacto con el agua. Para ello se han realizado ensayos de hinchamiento libre y colapso. Tanto en el ensayo de hinchamiento libre como en el de colapso se remoldean probetas con unas condiciones de densidad/humedad idénticas a las obtenidas en su correspondiente ensayo Proctor modificado (M0, M1, M2, M3). Las

dimensiones del molde empleado en el edómetro son 50 mm de diámetro, y 19-20 mm de altura dependiendo del anillo del edómetro.

El hinchamiento libre se ha realizado siguiendo la norma ASTM D 4546. Para cada una de las cuatro mezclas (M0, M1, M2, M3) se fabricaron tres probetas para obtener una repetibilidad en los resultados. El ensayo realizado en el aparato edométrico, se utiliza para evaluar la expansión que podría presentar el suelo en condiciones de servicio.

La probeta de suelo confinada en el anillo es sometida a una pequeña carga de ajuste de 5 kPa. La norma recomienda una tensión de ajuste de 1 kPa, sin embargo, el laboratorio no cuenta con instrumentos para aplicar dicha tensión. En todo caso en los resultados debido al cambio entre 1 o 5 kPa debe ser prácticamente inapreciable. La muestra es inundada y se registran sus variaciones de alturas según las lecturas del dial puesto en la cara superior. Las lecturas son tomadas siguiendo las recomendaciones de la norma: 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 15.0, 30.0 minutos y 1, 2, 4, 8, 24, 48, 72 horas, o hasta, que la variación de mediciones se estabilizara en 3 lecturas consecutivas distanciadas en intervalos de 1 hora.

El potencial de colapso ha sido determinado según norma ASTM D 5333. Para cada una de las cuatro mezclas (M0, M1, M2, M3) se fabricaron tres probetas para tener una repetibilidad en los resultados. El ensayo realizado en el edómetro busca encontrar el asentamiento producido en una muestra parcialmente saturada al ser inundada.

La probeta se somete a una carga de ajuste previa al ensayo de 5 kPa, y posteriormente se carga de forma creciente con las siguientes tensiones verticales: 12, 25, 50, 100, 200 kPa. Cada intervalo de carga se espera un tiempo de 2 horas. Finalizado el ciclo de carga se inunda la muestra y se registran los asentamientos producidos según lo indicado en la norma ASTM D 2435 (ensayo de consolidación). Al dejar de producirse asentamientos en la muestra se añade un nuevo escalón de carga, aplicando una presión vertical de 400 kPa.

2.4.4 Propiedades resistentes y de deformación

Las propiedades resistentes y deformacionales han sido estudiadas efectuando ensayo de compresión no confinada (CNC), siguiendo el procedimiento indicado en la norma ASTM D 2166.

Para cada una de las cuatro mezclas (M0, M1, M2, M3) se fabricaron doce probetas remoldeadas cilíndricas de 100 mm de altura y 50 mm de diámetro, las cuales fueron ensayadas en tríos (para obtener medias representativas), a distintas edades (0, 7, 28 y 90 días). Este proceso se realiza para evaluar el comportamiento de la resistencia de las probetas a la compresión uniaxial y su variación a través del tiempo.

Las probetas son remoldeadas con las condiciones óptimas obtenidas en el ensayo de Proctor modificado (DMCS y w_{opt}) de la mezcla 0. La humedad se dejaba homogenizar durante 1 hora previo a la confección de las probetas. Las probetas fabricadas se protegían de la pérdida de humedad recubriéndolas con *Parafilm M* (film recubierto en parafina) y almacenadas en recipientes cerrados, los cuales contaban con un doble fondo para regular la temperatura y la humedad relativa del interior (ver Figura 8). Las probetas se curan en el interior de la cámara húmeda hasta que alcancen su edad de ensayo. Las probetas se ensayaban a compresión uniaxial sin confinamiento lateral a una velocidad de avance de 1 mm por minuto (1, 2, 3 %/min). El ensayo de compresión fue desarrollado en el equipo multiaxial Humboldt Master Loader HM-3000.3F, perteneciente al laboratorio de geotecnia de la Universidad Católica Santísima Concepción.



Figura 8. Almacenamiento de probetas remoldeadas durante el período de curado para ser ensayadas a compresión no confinada.

Fuente: Elaboración propia

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados han sido interpretados empleando idéntica estructura en la que se ha efectuado utilizado en el apartado anterior. A continuación, se comenzará presentando los resultados de la caracterización química mineralógica.

3.1 Caracterización química y mineralógica

3.1.1 Fluorescencia de rayos X (XRF)

La Tabla 3 muestra los resultados de fluorescencia de rayos X efectuados sobre la escoria blanca. Los principales óxidos encontrados en la escoria de horno cuchara son el óxido de Calcio (CaO), la sílice (SiO₂), la alúmina (Al₂O₃) y el magnesio (MgO). Asimismo, se aprecia que los óxidos que la constituyen se encuentran dentro del rango de valores habituales, publicados por diversos autores. (ver Tabla 4), así como similares a la composición tradicional de un cemento Pórtland (Montenegro, 2012).

Tabla 3. Composición química de la escoria LFS

Fuente: Informe de análisis, compañía siderúrgica CAP, Concepción.

	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO	SiO ₂	P ₂ O ₅	S	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃
%	11,53	38,75	5,03	0,794	0,101	31,68	0,006	0,900	1,714	0,071	0,050

Tabla 4. Rangos habituales de contenido de elementos químicos escoria LFS

Fuente: Montenegro, 2013.

	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO	SiO ₂	P ₂ O ₅	S	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃
Rango %	4,3-35	30-60	1-11,9	0,22-3,3	0-5	2-35	0-0,4	-	0,3-0,9	-	-

3.1.2 Difracción de rayos X (XRD)

La Figura 9 muestra el resultado de difracción de rayos X (XRD) efectuados al suelo (mezcla 0). En el eje de abscisas el ángulo 2 θ mientras que en las ordenadas la intensidad. Cada punto del gráfico representa la intensidad del haz de luz reflejado a ese ángulo de difracción. Ubicando los picos máximos característicos de

cada mineral se puede detectar la presencia de ese. En la escoria se encontró mayoritariamente cuarzo (ver letra Q en la Figura 9), así como trazas de ilita (ver letra I en la Figura 9) y caolín (ver letra K en la Figura 9). Se recuerda, tal como se mencionó anteriormente que, no es posible cuantificar la cantidad de estos minerales, sino únicamente detectar su presencia. La elevada tasa de haces de luces difractados por el cuarzo, especialmente en comparación con otros minerales, genera una pérdida de precisión de los resultados. Es por ello, que se recomienda efectuar ensayos complementarios con un mayor paso (tiempo de emisión del haz de luz en cada ángulo 2Θ).

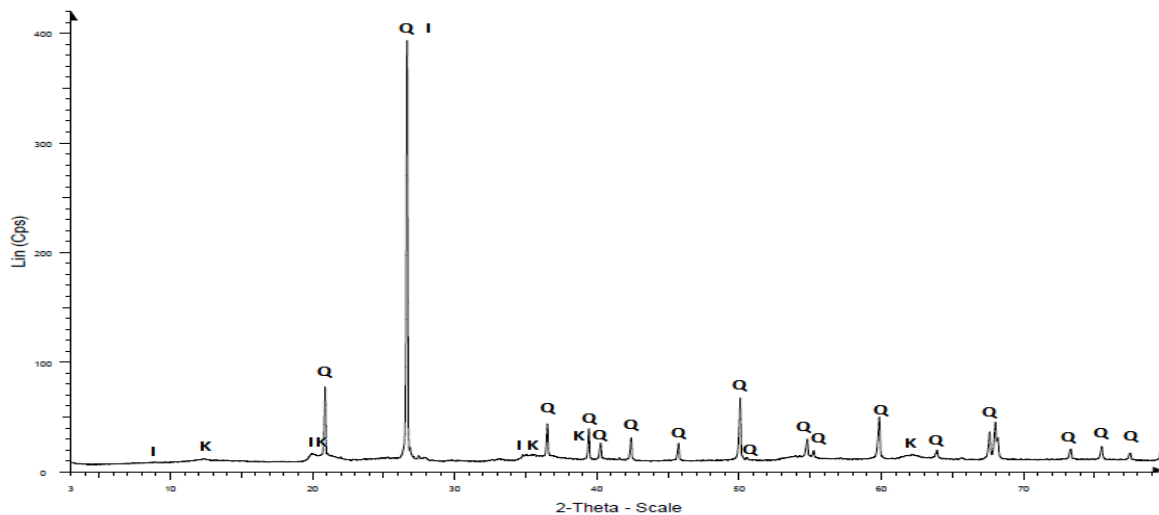


Figura 9. Resultado de la difracción de rayos X efectuado al suelo (mezcla 0).

Fuente: Informe laboratorio del Instituto GEA, Universidad de Concepción.

3.1.3 Termogravimetría (TG DTA)

La Figura 10 muestra el resultado del ensayo de termogravimetría con análisis térmico diferencia (TG/DTA) realizado al suelo (mezcla 0). En el eje de abscisas se encuentra la temperatura de ensayo -la cual oscila entre 0 y 1000 °C, mientras que en el de ordenadas el porcentaje de masa con respecto a la inicial (curva verde continua en Figura 10), la derivada de la pérdida de masa (curva verde discontinua en Figura 10), y la diferencia de temperatura de la muestra ensayada con respecto a la patrón (curva azul continua en Figura 10). Se puede identificar una pérdida de aproximadamente 1% de la masa total a los 100 °C correspondiendo a la pérdida del agua capilar del suelo. A temperatura cercanas a los 150, 200 y 800 °C se advierten, respectivamente, la descomposición del agua absorbida, la descomposición de hidróxidos de hierro y la separación del agua cristalina en la ilita, rangos similares a los determinados por Sedmale et al (2009) en estudios a arcillas. La mayor reducción del porcentaje de masa de la muestra de suelo ensayada se atribuye a la dehidroxilación de la caolinita, reacción que ocurre aproximadamente entre los 420 a 550 °C, valor coincidido por Wang et al. (2011) y Sahnoune et al. (2011). Finalmente, y alrededor de los 560 °C se aprecia el cambio polimórfico del cuarzo ($\alpha \rightarrow \beta$).

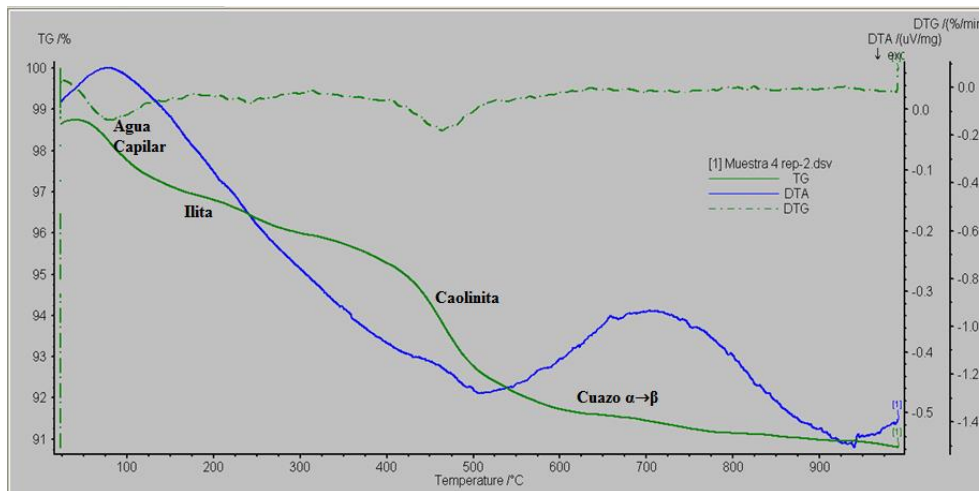


Figura 10. Resultados de la termogravimetría efectuada al suelo (mezcla 0)

Fuente: Informe N° 13446, Instituto de Investigaciones Tecnológicas, Universidad de Concepción.

3.2 Caracterización medioambiental

3.2.1 Lixiviación (TCLP)

Según los resultados obtenidos en el análisis medioambiental realizado a la escoria LFS y al suelo (mezcla 0) respectivamente (ver Tabla 5), y según el valor de concentración máxima permisible para cada elemento estipulada por el Decreto Supremo N° 148 (ver Tabla 2), establece que la concentración de los elementos presentes en las muestras no es tóxico al valorizar la escoria en caso de lixiviación natural.

Tabla 5. Resultados test TCLP Inorgánico, realizado a escoria LFS y suelo.

Fuente: Informe Análisis Químico SQC-38737. Laboratorio Contaminantes, Santiago.

Identificación muestra	Plomo	Cadmio	Mercurio	Cromo	Bario	Selenio	Arsénico	Plata
Escoria LFS	<0,2*	0,2	<0,02*	<0,2*	<0,5*	0,2	<0,1*	<0,2*
Suelo (M0)	0,2	0,3	<0,02*	<0,2*	<0,5*	<0,2*	<0,1*	<0,2*
CMP **	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.

3.3 Caracterización geotécnica

A continuación, se presentan los resultados de la caracterización geotécnica de las mezclas en estudios. Los ensayos fueron desarrollados en el laboratorio de geotecnia de la Universidad Católica de la Santísima Concepción.

3.3.1 Caracterización del material

La Figura 11 muestra el resultado del ensayo de granulometría del suelo arcillosos (mezcla 0). El suelo presenta aproximadamente un 60% de material bajo la malla #200 y un tamaño máximo de 0,85 mm.

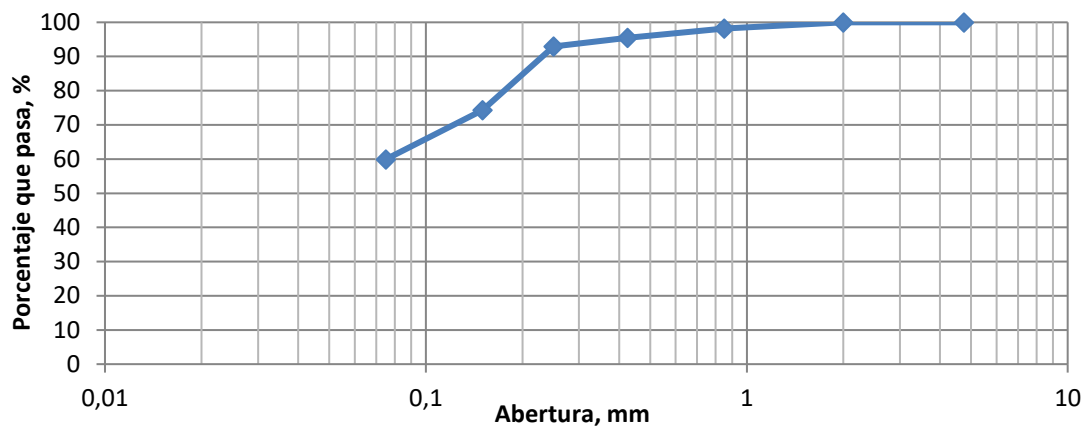


Figura 11. Curva granulométrica de suelo arcilloso (Mezcla 0).

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos en la determinación de los límites de Atterberg se presentan en la Tabla 6. Cabe destacar que las escorias al igual que las cenizas volantes y el relave en procesos industriales, no presenta plasticidad (Caballero, 2016).

Tabla 6. Resultados Límites de Atterberg para cada mezcla.

Fuente: Elaboración propia.

	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)
Mezcla 0	47	16	31
Mezcla 1	43	20	23
Mezcla 2	41	21	20
Mezcla 3	40	25	15
*Escoria blanca	NP	NP	NP

De los resultados obtenidos, se aprecia que existe una reducción del límite líquido del suelo (47%), frente a la adición de estabilizadores químicos (escorias y cales). Tales son los casos de las mezclas 1 (5% escoria), 2 (10% escoria) y 3 (1% cal), que presentan una reducción del límite líquido del suelo en un 9, 13 y 15 % respectivamente.

Existe una reducción en su índice de plasticidad y por tanto en su comportamiento plástico, lo cual se traduce en un beneficio en su utilización en obras viales. Este fenómeno se atribuye a que la escoria LFS, contiene un mayor porcentaje de suelo granular (arena) la cual mezclada con el suelo fino presente en las arcillas genera una mezcla con mayor graduación y menor plasticidad. Lo anterior se ve manifestado en la Figura 12.

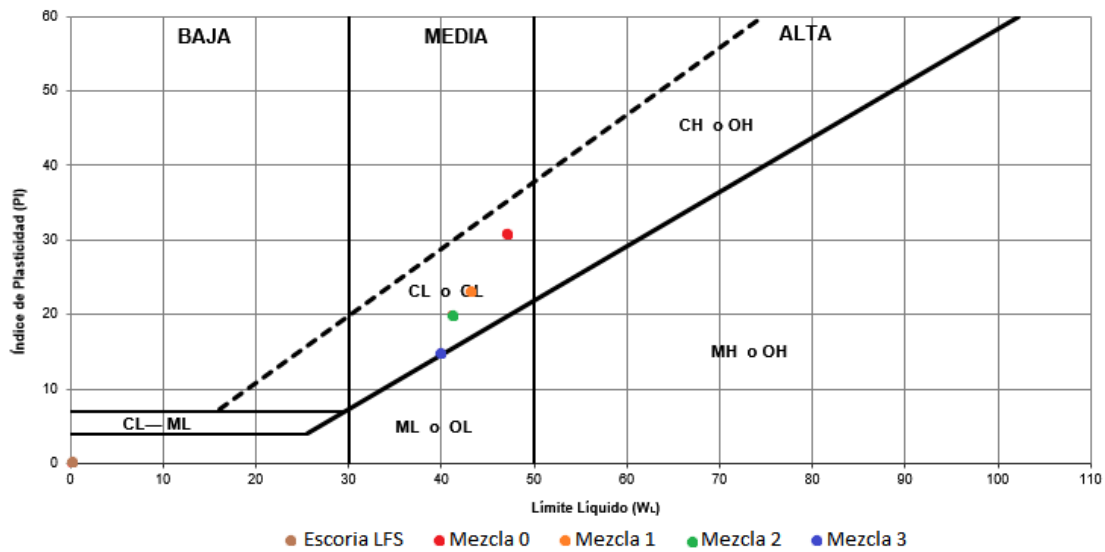


Figura 12: Carta de Casagrande en la que se muestran los resultados de las mezclas.

Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados obtenidos en los apartados 3.3.1, podemos clasificar el suelo arcilloso (Mezcla 0), como CL, según la clasificación USCS (Unified Soil Classification System).

La gravedad específica media (G_s) obtenido según la Ecuación 1 a partir de tres ensayos es de 2,65.

$$G_s = \frac{m_s}{(m_s + m_a) - M_m} \cdot \rho_{w_{te}} \quad \text{Ecuación 1.}$$

3.3.2 Propiedades de compactación

La Figura 13 muestra los resultados del ensayo Proctor modificado efectuado a se logra apreciar, que el suelo natural, tiende a aumentar su DMCS frente a la adición de escoria LFS asociada a una nueva y menor humedad óptima. Caso contrario ocurre con la adición de cal la cual, reduce el valor de la DMCS, pero está vez asociada a una nueva y mayor humedad óptima.

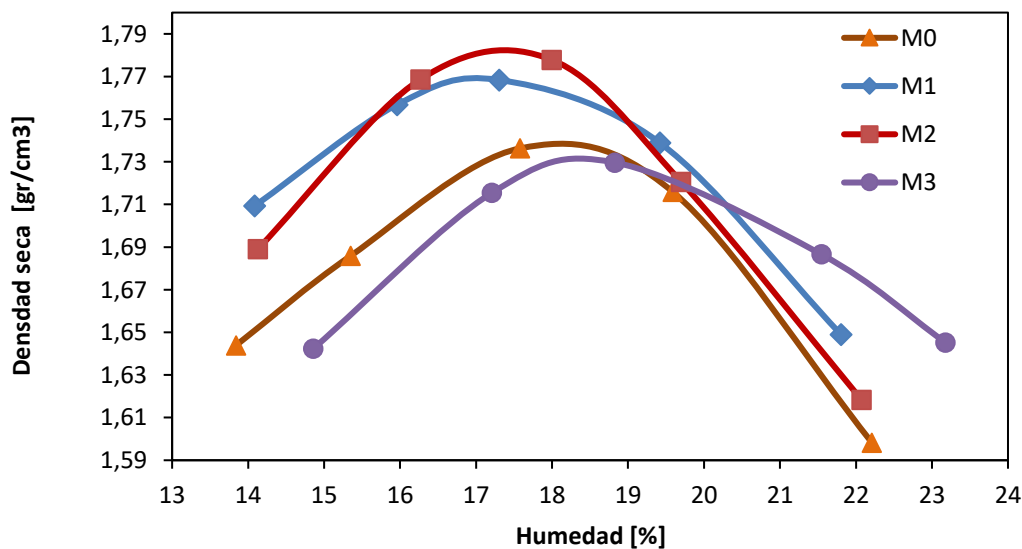


Figura 13. Curvas densidad seca vs humedad, resultados proctor modificado.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 7 se muestran los valores de DMCS y humedad óptima, encontrados gráficamente mediante la intersección del punto máximo de cada curva (correspondiente a una mezcla) con los ejes (ver Figura 13), procedimiento realizados a cada mezcla ensayada.

Tabla 7: Resultados DMCS y humedad óptima de mezclas ensayadas

Fuente: Elaboración propia.

	<i>DMCS (g/cm³)</i>	<i>W_{opt} (%)</i>
Mezcla 0	1,735	18
Mezcla 1	1,768	17
Mezcla 2	1,778	17
Mezcla 3	1,730	19

Los resultados de CBR obtenidos al 100% de la densidad máxima compactada seca correspondiente a cada mezcla pueden verse en la Tabla 8.

Las mezclas de suelo a las que se le añadió escoria en un 5% escoria (mezcla 1) y un 10% (mezcla 2) incrementaron su CBR con respecto al del suelo (CBR = 5), alcanzado valores de 7 y 8, respectivamente. Si bien la mezcla 2 (10% escoria) no alcanza la resistencia obtenida con la de la cal (mezcla 3), se observa un incremento del 60% con respecto al valor del suelo.

A través de los valores estipulados por Assis A. (1998) (ver Tabla 9), es posible clasificar de forma cualitativa las mejoras producidas en el suelo frente las adiciones de escorias blancas y cales respectivamente. Se puede apreciar que el suelo (mezcla 0), pasa de una clasificación Muy mala, a Mala y posteriormente a Regular-Buena, en consecuencia, de la adición de los agregados mencionados anteriormente (mezcla 1, 2 y 3 respectivamente).

Tabla 8: Resultados de CBR mezclas ensayadas.

Fuente: Elaboración propia.

	<i>CBR (%)</i>
Mezcla 0	5
Mezcla 1	7
Mezcla 2	8
Mezcla 3	12

Tabla 9: Clasificación y uso de suelos según valor de CBR

Fuente: 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

3.3.3 Estabilidad volumétrica

La estabilidad volumétrica ha sido estudiada mediante ensayos de hinchamiento libre y colapso.

La Figura 14 muestra los resultados de los tres ensayos efectuados a cada una de las mezclas (mezcla 0, 1, 2 y 3). A partir de la gráfica se observa que las muestras 1 y 2 se obtuvieron resultados inferiores que en la muestra 3. Esta diferencia se debe a un diferencial entre la relación densidad y humedad de fabricación de las probetas el cual se asigna al desprecio de la humedad hidrosópica en las dos primeras muestras ensayadas. La muestra tres fue elaborada con los criterios de DMCS y W_{opt} .

El suelo (mezcla 0) presenta un porcentaje de hinchamiento libre medio de 0,159%, mientras que en las mezclas 1 (5% escoria), 2 (10% escoria) y 3 (1% cal), se obtuvo valores de 0,154%, 0,101% y 0,165% respectivamente.

En todo caso, todos los valores son inferiores al 3%, máximo valor permitido para un material marginal, según Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), que corresponde al símil de Manual de carreteras chileno. Además, el suelo no presenta un aumento o disminución significativa de su hinchamiento (ver Figura 14), al añadir escorias y cal al suelo.

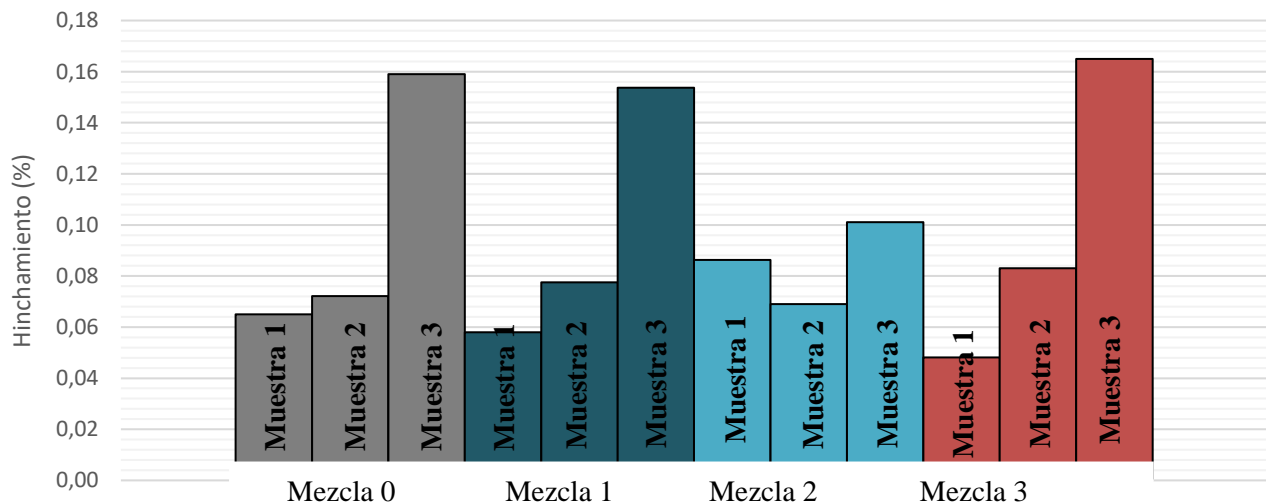


Figura 14. Resultados Hinchamiento Libre realizados a muestras ensayadas.

Fuente: Elaboración propia.

El colapso obtenido para cada una de las mezclas (mezcla 0, mezcla 1, mezcla 2 y mezcla 3) se muestran en la Tabla 10. Se recuerda que, tal como se comentó en el apartado 2.4.3, el suelo fue remoldeado con la correspondiente condiciones densidad y humedad obtenidas en el ensayo Proctor modificado de cada una de ellas. En el suelo (mezcla 0) se obtuvo un índice de colapso medio de 0,04 %, el cual se considerará un valor prácticamente nulo. Las mezclas a las que se le agregó escoria (mezcla 1 y mezcla 2) como cal (mezcla 3) el índice de colapso promedio obtenido fue igual o inferior al del suelo.

En todo caso, el suelo estudiado (mezcla 0) no presenta riesgo de colapso, teniendo en cuenta el criterio de Jenning y Knight (ver Tabla 11).

Tabla 10. Índices de colapso de las mezclas.

Fuente: Elaboración propia.

	<i>Índice de colapso (%)</i>
Mezcla 0	0,0478
Mezcla 1	0,0459
Mezcla 2	0,0412
Mezcla 3	0,0223

Tabla 11. Clasificación del colapso.

Fuente: Jennings y Knight (1975)

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

3.3.4 Propiedades resistentes y de deformación

La Figura 15 muestra valores medios (puntos) e intervalos (obtenidos a partir de la desviación estándar) obtenidos a cada edad y mezcla (mezcla 0, mezcla 1, mezcla 2 y mezcla 3) en el ensayo de la resistencia a compresión simple. En las abscisas se presenta la edad de curado de las probetas, mientras que en el de las ordenadas la resistencia a la compresión simple en kPa. A partir de los resultados obtenidos se ha estimado una línea de tendencia de la tensión normal máxima obtenida con respecto a la edad de cada muestra al momento del ensayo (ver líneas discontinuas en Figura 15).

El suelo arcilloso (mezcla 0) (ver línea segmentada color negro en Figura 15) no varía su resistencia con el tiempo de curado. Este resultado era esperable, dado que no se ha agregado ningún estabilizador químico y se ha asegurado –envolviendo las probetas con *Parafilm M*- que no varíe su contenido de humedad.

A la edad de 0 días

En las mezclas con un 5% de escoria (mezcla 1)(ver línea segmentada color azul en Figura 15) y con un 1% de cal (mezcla 3) (ver línea segmentada color rojo en Figura 15) se advierte un ligero incremento de la resistencia a la compresión simple media con el tiempo de curado. Por el contrario, en la mezcla con un 10 % de escoria (mezcla 2)(ver línea segmentada color gris en Figura 15) no se advierte aumento significativo de la resistencia.

A la edad de 90 días

A diferencia de lo que sucede con la mezcla 1, a las que se le agregó un 10 % de escoria (mezcla 2) no se advierte un aumento en la resistencia. Es más, los resultados muestran un nulo aumento de la resistencia. La muestra con un 5% de escoria (mezcla 1), es la mezcla que presenta un mayor incremento en la resistencia a la compresión simple, aumenta desde los 1050 hasta los 1250 kPa al pasar 90 días de curado. La muestra con un 1 % de cal (mezcla 3) es la mezcla que presenta la menor tensión normal máxima a la edad de 0 días al compararlas con las demás mezclas (mezcla 0, mezcla 1 y mezcla 2). Tal y como era de esperar, a medida que aumenta el tiempo de curado, la resistencia a la compresión simple también se incrementa. aumenta desde los 680 hasta los 1030 kPa al pasar 90 días de curado.

Se advierte que los valores de resistencias obtenidos por las mezclas 1 y 2, no son máximos ni representativos, debido a que las probetas fueron confeccionadas con la densidad máxima compactada seca y humedad óptima de la mezcla 0, y en ambos casos (mezcla 1 y 2), los parámetros de las mezclas alcanzan valores mayores con respecto a los cuales fueron elaboradas (ver curva de relación densidad-humedad ensayo proctor modificado, Figura 13). La mezcla 3 (cal 1%), presenta un aumento en su resistencia a la compresión con respecto al tiempo de curado, evidenciando un mayor incremento en el periodo comprendido antes de los 28 días.

En síntesis, se advierte una mejora en la resistencia a la compresión uniaxial en suelos arcillosos, frente a la adición de escoria LFS, pero no es posible cuantificarlo, debido a que las probetas no fueron confeccionadas con los parámetros de densidad y humedad máxima asociada a mezcla.

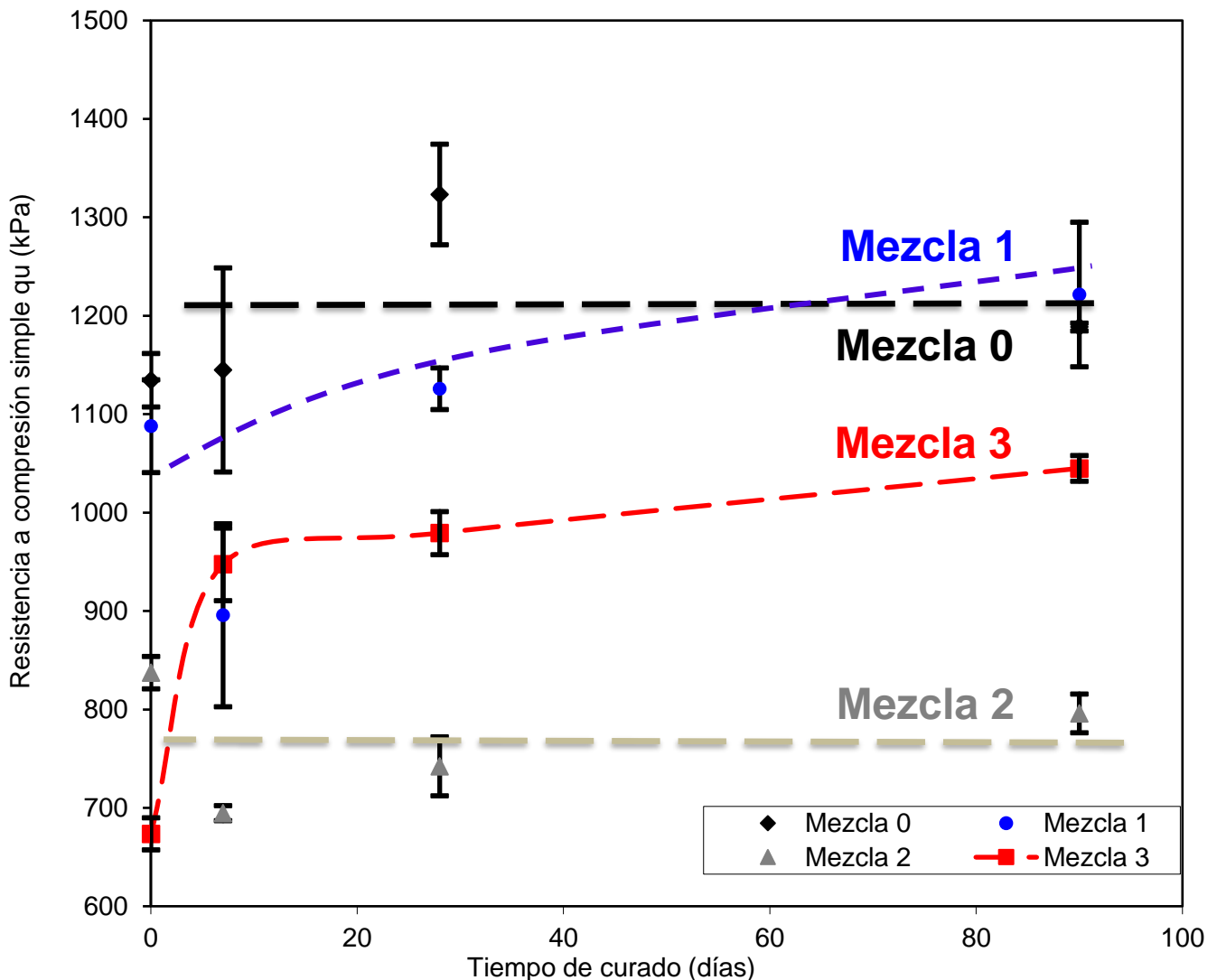


Figura 15. Resultados compresión no confinada a distintas edades aplicadas a mezclas en estudio.
 Fuente: Elaboración propia.

4. CONCLUSIÓN

A continuación, se exponen las conclusiones con mayor relevancia, con referencia al estudio y los experimentos realizados y plasmados en este proyecto de investigación.

- La toxicidad potencial de las escorias por lixiviación debe ser considerado como obligatorio e indispensable frente al empleo de este material, para usos en el medioambiente. Asimismo, se determinó mediante los ensayos correspondientes, que la escoria blanca (LFS) presentada en esta investigación, no presenta un factor del riesgo al medioambiente.
- Las principales mejoras geotécnicas evidenciadas producto de la adición de escoria al suelo arcilloso son: disminución de la plasticidad, modificación las características de compactación (aumenta peso específico seco y disminuye humedad), aumento del valor CBR. Asimismo, se ha medido un aumento de la resistencia a la compresión simple de las mezclas a medida que aumenta su tiempo de curado. Según ensayos de hinchamiento libre y colapso las mezclas de suelo escoria no presentan variación volumétrica.

- Según los resultados obtenidos en la presente investigación la escoria LFS o de horno de cuchara, presenta indicios de que podría ser utilizado de modo eficiente como adiciones a un suelo arcilloso, en obras viales.
- Es requerido un tratamiento previo en los materiales previo a la realización de las mezclas (secado, machacado), para garantizar mezclas homogéneas y resguardar sus propiedades.
- Se plantea el estudio periódico de la estabilidad volumétrica o dimensional, debido a que no pudo ser cuantificado en la investigación, y así poder garantizar la inexistencia de problemas de expansibilidad.
- Se recomienda línea de investigación, de los ensayos en condiciones de peso específico seco y humedades óptimos, asociados a cada suelo. Y la adición de mezclas con mayor porcentaje de escoria (sobre el 10%), para la evaluación de posibles aumentos en la capacidad portante.

5. REFERENCIAS

- **Apraiz, J., (1984):** “Fabricacion de hierro, aceros y fundiciones” Urmo S.A. de Ediciones.
- **ASTM D 1557 (2012):** “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort”, American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual Book of ASTM Standards.
- **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.
- **ASTM D 2166 (1980):** “Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil”, American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual Book of ASTM Standards.
- **ASTM D 2435 (1980):** “Standard Test Methods for One Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading”, American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual Book of ASTM Standards.
- **ASTM D 422 (2002):** “Standard Test Methods for Particle-Size Analisis of Soils”, American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual Book of ASTM Standards.
- **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.
- **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.
- **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.
- **ASTM D 5550 (2014):** “Standard Test Methods for Specific Gravity os Soil Solids by Gas Pycnometer”, American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual Book of ASTM Standards.
- **Caballero, A. (2016):** “Caracterizacion de la escoria blanca proveniente de la siderurgia integral”.
- **Callister, W., (2002):** “Introducion a la ciencia de los materiale”, Editorial Reveté S.A. Vol I.
- **Direction des Routes et de la circulation routiere, 1981.** Francia
- **Fruehan, R.J. (1998):** “The making, shaping and treating of steel”, AISE Steel Foundation, 11^a Edicion, Pittsburgh, PA, Estados Unidos.
- **Hewlet, P. (1998):** “Lea’s chemistry of cement and concrete” 14^a edicion, New York.
- **IHOBE (1999):** “Libro blanco para la minimizacion de residuos y emisiones: Escorias de aceria”, Bilbao Espana.
- **Jimenez Salas, J. A. y De Justo Alpanes, J. L. (1975):** “Geotecnia y cimientos I: propiedades de los suelos y de las rocas”, editorial Rueda, 2^a edicion.
- **Kanagawa, A. and Kuwayama, T. (1997):** “The improvement of soft clayey soils utilizing reducing slag produced from electric arc furnace” Denki Seiko
- **Koros, P. (2003):** “Dust, scale, slags, sludges not wastes, but sources of profits”.

- **Manso, J.M., (2005):** “Fabricacion de hormigon hidraulico con escoria negra de horno electrico de arco”, Tesis doctoral, Universidad de Burgos, Espana.
- **Manual de carreteras** – Ministerio de obras publicas, Chile. Edicion 2015
- **Montenegro J. M., (2012):** “Valorizacion de suelos no aprovechables de la traza mediante su mezcla con escoria blanca de acereria electrica en la contruccion de infraestructuras del transporte terrestre: ejecucion de un terraplen experimental”. Tesis doctoral, Universidad de Cantabria.
- **Montenegro J.M., Celemin-Matachana M., Ph.D., Canizal J., Ph.D., and Setien J., Ph.D. (2013):** “Ladle furnace slag in the construction of embankments: Expansive behavior”, Journal of Materials of Civil Engineering.
- **Nazer et al. (2013):** “Caracterizacion de escorias de cobre de fundiciones chilenas del siglo XIX”. Revista de Metalurgia, CENIM-CSIC.
- **NCh 1516 of 79:** “Mecanica de suelos - Determinacion de la densidad en el terreno - Metodo del cono de arena”.
- **NCh 1534 /2 of 79** “Mmecanica de suelos – Relaciones humedad/densidad”
- **NCh 1928 of 93:** “Arbanileria armada – Requisitos para el diseno y calculo”.
- **NCh 2256 of 2001:** “Morteros- parte 1: requisitos generales”.
- **NCh 2754 of 2003** (Test TCLP – EPA 1311)
- **Ortega, V. (2011):** “Aprovechiamento de escoria blancas (LFS) y negras (EAFS) de aceria electrica en la estabilizacion de suelos y en capas firmes de caminos rurales”. Tesis doctoral, Universidad de Burgos, Espana.
- **Ortuno, L. Y Rodriguez, J. L. (2000):** “La estabilizacion del suelo con cal como mejora de suelos”.
- **Pasetto, M., Baldo, N. (2013):** “Eletric arc furnace steel slag in “high performance” asphalt mixes: a laboratory characterisation”.
- **Pliego de prescripciones tecnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG3).** Espana
- **Shi, C y Hu, S. (2003):** “Cementitious properties of ladle furnace slag fines under autoclave curing conditions”, Cement and Concrete Research.
- **Shi, C. (2004):** “Steel slag- Its production, processing, characteristics and cementitious properties”, Journal of Civil Engineering.
- **World Steel Association (2016):** “Steel statistical yearbook 2016”.
- **Ziegert, C. (2011):** “Analisis de muestras de arcilla y mortero de arcillas”.
- **Sedmale, G., Cimmers, A., Sedmalis, U. and Celms, A. (2009):** “Characteristics of illite clay and compositions for porous building ceramics production”
- **Wang, H., Li, C., Peng, Z. and Zhang (2011):** “Characterizaion and thermal behavior of kaolin”.
- **Jenning, J.E., Knight, K. (1975):**” A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure”,