

Propiedades resistentes y expansivas de una mezcla de suelo arcilloso y escoria blanca (LFS) proveniente de una planta de siderurgia integral.

N. Zárate Cabrera¹, J. Montenegro Cooper² y P. Lapeña³

RESUMEN:

El acero es uno de los materiales de construcción más demandados en Chile. La Compañía Siderúrgica Huachipato S.A., ubicados en la Región del Biobío, es la principal generadora y como resultado del proceso de manufactura, se obtienen diversos tipos de escorias. Esta investigación, tiene como foco de estudio la escoria blanca o "Ladle Furnace Slag" (LFS), proveniente del horno cuchara en donde se lleva a cabo el afino de la colada de acero. Considerando que, por cada tonelada de acero fabricado se generan entre 20 a 30 kg de LFS, sumado a una constante alza de producción, se tiene como consecuencia miles de toneladas de escoria blanca por año, que, son remotamente reutilizadas, o bien, se destinan a botaderos, generando elevados costos en transporte y acopio. Esta realidad, justifica el desarrollo de esta investigación, y con ella, profundizar en el conocimiento que guie la reutilización de este subproducto como nuevo material en la estabilización de suelos para obras viales.

En la línea de aprovechamiento mencionada, es imprescindible conocer la influencia de esta escoria en mezclas con suelo. La presente investigación, busca determinar las propiedades resistentes junto con la estabilidad volumétrica en mezclas de suelo-escoria blanca, efectuando para ello, los siguientes ensayos geotécnicos: potencial de expansión, compresión simple y pH para determinar la proporción adecuada de suelo y escoria. De los resultados, se analiza la posibilidad de mejoras en las propiedades mecánicas de las mezclas a diferentes edades de curado en comparación con una mezcla de suelo y cal.

Finalmente, la certeza que este subproducto no presenta problemas medioambientales para su utilización, junto con la probabilidad de mejora en la resistencia del suelo debido a reacciones cementantes, y, la alta estabilidad volumétrica de las mezclas, se traducen en avances para recomendar este subproducto como estabilizador de suelos en obras viales.

PALABRAS CLAVES: Escoria blanca, propiedades resistentes, estabilidad volumétrica.

ABSTRACT:

Steel is one of the most demanded construction materials in Chile. The Sierúrgica Huachipato S.A. Company, located in the Biobío Region, is the main generator and, as a result of the manufacturing process, various types of slag are obtained. This research has as its focus the white slag or "Ladle Furnace Slag" (LFS), coming from the spoon furnace where the refining of the steel casting takes place. Considering that, for every tonne of steel manufactured, between 20 and 30 kg of LFS are generated, added to a constant increase in production, thousands of tons of white slag are produced per year, which are remotely reused, or, destined to dumps, generating high costs in transportation and storage. This reality justifies the development of this research, and with it, to deepen the knowledge that guides the reuse of this by-product as new material in the stabilization of soils for road works.

At line to use mentioned, it is essential to know the influence of this slag in mixtures with soil. The present investigation, seeks to determine the resistant properties together with the volumetric stability in mixtures of soil-white slag, making for it, the following geotechnical tests: potential of expansion, simple compression and

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

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

³ Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile, plapena@ucsc.cl

pH to determine the adequate proportion of soil and slag. From the results, the possibility of improvements in the mechanical properties of the mixtures at different ages of curing compared to a mixture of soil and lime is analyzed.

Finally, the certainty that this byproduct does not present environmental problems for its use, together with the probability of improvement in the resistance of the soil due to cementing reactions, and, the high volumetric stability of the mixtures, translate into advances to recommend this by-product as soil stabilizer in road works.

KEYWORDS: White slag, resistant properties, volumetric stability.

1. INTRODUCCIÓN

La estabilización de suelos es un procedimiento antiguo, que tiene por finalidad mejorar las propiedades físicas y/o mecánicas de un suelo. Estas modificaciones al terreno pueden llevarse a cabo de dos formas: mediante la estabilización mecánica, la que se realiza con procedimientos mecánicos o bien, por medio de la estabilización química, efectuándose con la incorporación de un producto químico, ya sea natural o sintético, que por su acción o combinación con el suelo mejorará una o más propiedades de desempeño. El uso moderno de esta técnica en ingeniería ha sido empleado con profusión en carreteras y terraplenes, utilizando la cal y el cemento como principal estabilizador.

La disciplina responsable de estudiar, implementar y perfeccionar el procedimiento de estabilización a los suelos es la ingeniería geotécnica, que es la rama de la ingeniería civil encargada del estudio de las propiedades mecánicas e hidráulicas de un terreno, pero como toda ciencia, está en permanente renovación. Esto promueve a innovar, mejorar o sustituir materiales y técnicas que han sido ampliamente utilizadas, lo que permite corregir y progresar en lo ya sabido. Bajo este punto de vista, la investigación de residuos industriales que, posterior a diversos estudios y análisis cambian su estatus a subproductos, no es nueva. Variados autores, como se observará en esta investigación, debido al beneficio económico que conlleva y a la creciente importancia medioambiental por minimizar la creación de nuevos préstamos y vertederos, se han enfocado en desarrollar y expandir el conocimiento e incipientes aportes al considerar nuevos elementos; así, un volumen importante de subproductos industriales podría ser reutilizado en el proceso de estabilización de suelos.

Debido a la gran diversidad de industrias que hay en Chile, se generan anualmente millones de toneladas de residuos, y serán objeto de esta investigación aquellos derivados de la industria acerera, específicamente la escoria blanca o Ladle Furnace Slag[®] (LFS). Cabe mencionar que, en Chile la fabricación de acero se realiza mediante dos procesos diferentes: siderurgia eléctrica (Gerdau AZA situada en Santiago), y siderurgia integral (CAP ubicada en Concepción). La mayor cantidad de acero manufacturado en el país se produce por este último procedimiento (815 mil toneladas métricas en el año 2016).

La escoria blanca se produce en el proceso de afino de la colada de acero que se efectúa en el horno cuchara. Esta es la última etapa del proceso de fabricación de acero, tanto si se utiliza la integral como en el caso de la eléctrica. Dependiendo del tipo de acero que se desee obtener (acero común, especial o inoxidable) variarán las condiciones que le darán al acero fabricado en el horno cuchara y con ello las propiedades de la escoria resultante.

En general, las escorias de horno cuchara tienen óxidos de calcio, aluminio y magnesio, traduciéndose en más de un 85% de la masa total del material (Caballero, 2017). La elevada presencia de los óxidos antes citados junto con unos adecuados índices de basicidad, hace pensar que esta escoria puede presentar propiedades cementantes al contacto con agua y otros minerales del suelo.

Las propiedades de interés que se estudiarán son función del uso que se le pretende dar a la escoria blanca. Como la línea de aprovechamiento que se analiza, está ligada a la estabilización de suelos, la investigación se dirigirá en la utilización de la escoria blanca como agente cementante. En tal caso, los parámetros resistentes en mezclas con suelo, el comportamiento y evolución de las mezclas suelo-escoria blanca en el tiempo y la estabilidad volumétrica determinada por las propiedades expansivas de la escoria blanca serán objeto de esta investigación.

Las propiedades cementantes de un material se desarrollan teniendo en cuenta varios factores, entre los que se puede mencionar: el contenido de puzolanas (natural y/o sintética), el cual consta de óxidos de sílice y de aluminio disponibles químicamente para reaccionar con el hidróxido de calcio para; dar lugar a la formación de nuevos minerales. Estas reacciones elevan la resistencia, debido al endurecimiento. Cabe señalar que las reacciones cementantes se dan a largo plazo, mientras se mantenga el pH elevado cercano a 12,4 (Ortuño & Rodríguez, 2000). Las escorias blancas presentan propiedades puzolánicas, así como una elevada proporción de finos; cuanto más fina es la escoria mejores propiedades cementantes adquiere (Herrero, 2015). Otros factores de los que dependerán las reacciones cementicias de las escorias son: tipo de escoria, tipo y cantidad de fundentes añadidos en la etapa de afino, el tipo de acero a producir, la velocidad y modalidad de enfriamiento de la escoria (Montenegro, 2012).

Por otra parte, la estabilidad volumétrica de las mezclas de suelo y escoria blanca representa el factor más relevante a analizar debido a la naturaleza expansiva de la segunda, puesto que, es un material que en contacto con agua experimenta cambios de volumen. Este comportamiento expansivo se debe a que la presencia de cal libre (CaO) y de periclasa (MgO) genera tardías reacciones de hidratación y carbonatación.

En relación a los diversos usos que se le han dado a los distintos tipos de escoria de acería alrededor del mundo, es posible encontrar una vasta bibliografía. En el siguiente párrafo se recogen algunos de ellos: Arribas et al., (2014) y Anastasiou et al., (2014) han investigado el uso de la escoria de arco eléctrico y escoria blanca como sustituto del agregado convencional utilizado en hormigones para estudiar la mejora en la resistencia a la compresión y durabilidad de éstos. Se han analizado además las propiedades mecánicas de la escoria convertidor al oxígeno, escoria de horno de arco eléctrico (EAFS) y la escoria blanca (LFS) para un uso potencial como material de construcción de carreteras, en forma similar a un árido natural (Geiseler, 1996, Motz y Geiseler, 2001 y Maghool et al., 2017).

Finalmente, diversos autores han desarrollado estudios que se han enfocado específicamente en la utilización de la escoria de horno cuchara como subproducto útil para la estabilización de suelos, estudiando las reacciones de ésta en mezclas con suelo (Montenegro, 2012, Manso et al., 2013 y Ortega-López et al., 2014). Otros subproductos destinados a la estabilización de suelos son las cenizas volantes de la quema de carbón y el polvo del horno de cemento (Kolias et al., 2005).

Estos trabajos nos indican que en el campo de la estabilización de suelos, las escorias y otros subproductos industriales se han utilizado logrando eficaces resultados. De esta literatura, es posible inferir que la búsqueda de soluciones para mejorar un suelo no es nueva, y la opción de reutilizar la escoria de horno cuchara cada vez toma más ímpetu.

Como anteriormente se ha mencionado, el estudio en esta investigación de la escoria blanca está ligado al potencial uso de este subproducto como estabilizador en suelos. Con este objeto, se han elaborado mezclas de suelo y escoria blanca. El suelo utilizado para ellas es un suelo arcilloso, y el análisis se dirige a la mejora de sus propiedades resistentes por la presencia de escoria blanca en él. Es decir, que la escoria de horno cuchara es un material ideal para ser utilizado como estabilizador, debido a sus propiedades cementantes, y que a pesar de ser un subproducto con una baja estabilidad volumétrica, en mezclas controladas con suelo, este factor sea despreciable o nulo.

La presente investigación, viene a complementar el estudio realizado por Caballero, (2017) y Leiva, (2017), en los que se efectuó la caracterización de los materiales unitarios (suelo arcilloso y escoria blanca), así como la mezcla binaria entre ellos a diferentes proporciones. Aportando principalmente en el conocimiento de las propiedades geotécnicas de las mezclas al compararlas con la mezcla de suelo y cal. Esto tiene por finalidad analizar las prestaciones mecánicas y de durabilidad que brindan, como también, concretar la correcta valorización de este subproducto industrial, y así recomendarlo como material estabilizador para obras viales.

2. MATERIALES Y TÉCNICAS UTILIZADAS EN LA INVESTIGACIÓN

Se describe a continuación la preparación de los materiales unitarios con los que se componen las mezclas estudiadas en la presente investigación; posterior a esto, se detallan las normas y procedimientos empleados en la realización de los ensayos de laboratorio de las mezclas con la finalidad de examinar sus propiedades resistentes y su estabilidad volumétrica.

2.1 Materiales

Los componentes unitarios con los que se elaboran las mezclas analizadas en la presente investigación son: suelo arcilloso, escoria blanca (LFS) y cal apagada. El porcentaje de los materiales, especialmente el de escoria y de cal apagada, corresponde a peso de material seco. Todos los materiales han sido tamizados por la malla #10 (abertura 2,00 mm) y con ellos se realizaron las siguientes muestras: suelo arcilloso, suelo arcilloso con 5% de escoria blanca, suelo arcilloso con 10% de escoria blanca y suelo arcilloso con 1% de cal apagada (éstas en relación al porcentaje en peso seco) las que se denominaron M0, M1, M2 y M3 respectivamente como se recoge en la tabla 1.

Tabla 1: Nombre, notación y porcentaje en peso seco de las mezclas.

Nombre	Notación	Porcentaje en peso seco [%]		
		Suelo	Escoria	Cal
Mezcla 0	M0	100	-	-
Mezcla 1	M1	95	5	-
Mezcla 2	M2	90	10	-
Mezcla 3	M3	99	-	1

2.1.1 Suelo

El suelo utilizado proviene del loteo San José del Mar, ubicado en el sector Quebrada Honda de Tomé, provincia de Concepción, Chile. El mencionado suelo se clasifica como CL, según la USCS (Unified Soil Classification System), es decir, una arcilla inorgánica de baja compresibilidad.

La disgregación del material se efectuó con suelo seco, el que fue introducido en la máquina de desgaste de los ángeles, en su interior se encuentran doce esferas de acero cuyas dimensiones son: 47 mm de diámetro y 400 g de masa. Posteriormente, los terrones fueron machacados con un mazo de goma logrando partículas con un tamaño cercano al original. Es preciso señalar que la presente metodología fue empleada para reducir el tiempo de machaqueo mediante el mazo de goma. La utilización de la máquina de Los ángeles y teniendo en cuenta que el tamaño máximo del suelo es inferior y el porcentaje de finos es 1mm y superior a 60%, respectivamente.

2.1.2 Escoria

La escoria blanca (Ladle Furnace Slag o LFS) estudiada fue proporcionada por la Compañía Siderúrgica Huachipato S.A, planta que manufactura acero mediante la siderurgia integral. Esta escoria es el subproducto que se genera cuando se afina la colada de acero en el horno cuchara, en esta etapa la sílice (SiO_2) y la alúmina (Al_2O_3) en exceso son absorbidas por la escoria (Caballero, 2017). En su investigación “*Caracterización de la Escoria Blanca Proveniente de la Siderurgia Integral*” se pueden encontrar sus importantes resultados, en los cuales se concluye principalmente que la escoria blanca es un material fino que no presenta plasticidad, tiene densidades menores a suelos con características similares, un CBR de 18% que corresponde a sub-rasante regular a buena y excelente estabilidad volumétrica debido a que forma una masa compacta y cementada.

2.1.3 Cal

La mezcla M3 está compuesta con cal hidráulica apagada o cal natural. La principal razón por la que se incluye en esta investigación es porque actualmente este material es el estabilizador químico más utilizado en obras viales debido a que se conoce profundamente su excelente desempeño, además que la adición de cal proporciona el ambiente básico necesario, cuyo resultado final es una cementación progresiva del terreno estabilizado, que puede seguir desarrollándose a lo largo de bastantes años (Ortuño et al., 2000).

2.2 Preparación de las mezclas suelo/escoria y suelo/cal.

Una vez preparados los materiales éstos fueron almacenados herméticamente con el objeto de que no sufrieran contaminación con ningún otro residuo que pudiera haber en el lugar de almacenamiento. Cada vez que se iba a elaborar una mezcla, éstos se oreaban para que alcanzaran la humedad higroscópica, y 24 horas antes se determinaba la humedad según NCh 1515.

Para garantizar la homogeneidad de las muestras y con ello la veracidad de los ensayos, se realizaron dos procedimientos de combinación de materiales conforme a la cantidad de mezcla requerida, uno automático y uno manual. El método automático se ejecutó en una maquina mezcladora, que usualmente se usa para morteros, con una capacidad de 4 kilos durante quince minutos, esta técnica se realizó para las mezclas destinadas al ensayo de expansión potencial, el cual requería de al menos 10 kilos para su desarrollo. Por otra parte, el procedimiento manual consistía en dejar los componentes en una bandeja y con la ayuda de una espátula combinarlos por unos diez minutos. La mezcla se realizó de este modo para los ensayos de compresión simple y pH, en éstos se necesitaban cantidades menores a 2 kilos.

2.3 Métodos utilizados para el estudio geotécnico

La investigación de las propiedades geotécnicas de las mezclas, vale decir, el estudio de sus parámetros resistentes como también el análisis de la estabilidad volumétrica que presentan, ha sido llevado a cabo mediante ensayos de laboratorio y procedimientos que se efectúan usualmente en suelos con similares características.

Para el desarrollo de los ensayos, se utilizaron principalmente normas ASTM. De manera secundaria, se aplicó la normativa chilena. Esta metodología se definió así con la finalidad de ir acercándonos al objetivo principal, el cual consiste en estudiar si existen mejoras en la resistencia mecánica del suelo debido a la presencia de escoria blanca, y, además, si la estabilidad volumétrica es un factor de riesgo determinante para el uso de este subproducto como estabilizador en obras viales.

Los ensayos que han sido ejecutados, considerando su propósito se agruparon de la siguiente manera:

1. Propiedades cementantes
2. Propiedades expansivas

Así, el primer ensayo realizado es el de compresión no confinada, el que tuvo como objetivo principal, estudiar el comportamiento de las mezclas a diferentes edades, y comparar sus resistencias con una mezcla de suelo y cal; las edades de curado fueron: 0,7, 28 y 90 días.

Luego, para evaluar que el porcentaje de escoria añadido es el óptimo para el tipo de suelo estudiado, vale decir, para encontrar el menor porcentaje de escoria para el cual el suelo-escoria presentará propiedades cementantes, se llevó a cabo el ensayo de pH. Se determinará el porcentaje mínimo con el que la mezcla alcanza un pH de 12,4. Varios autores y normativas indican que con un valor de pH igual al anteriormente citado, es más factible que en la mezcla se desarrollen reacciones químicas necesarias para estabilizar el suelo.

Y, finalmente, el que es sin duda el factor más importante en este estudio, corresponde al análisis de la estabilidad volumétrica de las muestras. Para ello, se efectuó el ensayo de Potencial de Expansión, en el que se aceleran las reacciones químicas de las mezclas para observar si se presentan o no variaciones de volumen asociadas a un hinchamiento. La relevancia de estos resultados, es comprobar si las mezclas suelo-escoria investigadas son estables, lo que implicaría que el uso de la escoria LFS como material estabilizador en suelos arcillosos es potentemente viable. Esto se traduciría en una alternativa práctica de reutilización al final de la vida útil de este subproducto, y el desvío de una gran cantidad de estos materiales en los vertederos.

2.3.1 Propiedades cementantes

La evolución temporal de las propiedades mecánicas producidas por las reacciones de cementación de la escoria, fueron registradas mediante el ensayo de compresión no confinada conforme a la norma ASTM 2166. El análisis de las mezclas M0, M1, M2 y M3 fue realizado mediante probetas cilíndricas de diámetro y altura 50 y 100 mm respectivamente. Se remoldearon doce probetas por mezcla con su correspondiente densidad máxima compactada seca (DMCS) y humedad óptima obtenida en el ensayo Proctor modificado. Las probetas fueron curadas durante 0, 7, 28 y 90 días, habiendo sido ensayadas a compresión simple tres probetas por cada edad.

Considerando la plasticidad del suelo, el tratamiento que se le dio al material previo a su compactación, consistió en amasar cada muestra con al menos 20 horas de antelación, de esta forma, nos aseguramos la adecuada distribución del agua de amasado. Por otra parte, para evitar la evaporación del agua, y con ello pérdidas en la humedad de las probetas, éstas fueron protegidas inmediatamente después de su elaboración con un parafilm, y almacenadas durante todo el tiempo de curado en una cámara húmeda, dentro de un recipiente cerrado y con agua para regular la temperatura como se muestra en la figura 1.



Figura 1: Almacenamiento de probetas remoldeadas para ensayo de CNC.

Fuente: Elaboración propia.

El ensayo de compresión no confinada, consiste básicamente en aplicar a las probetas una compresión uniaxial sin confinamiento lateral, a diferencia del ensayo de compresión triaxial. La velocidad de avance fue constante e igual a 2 %/min, que corresponde a 2%/min como se observa en la Figura 2.



Figura 2: Ensayo de Compresión no Confinada, según ASTM D 2166.
Fuente: Elaboración propia.

El objetivo es obtener rápidamente un valor aproximado de la resistencia a la compresión uniaxial, en términos de esfuerzos totales, esta resistencia se denomina resistencia a la compresión no confinada (q_u) y representa el mínimo esfuerzo compresivo necesario para romper una muestra no confinada de suelo en condiciones normalizadas.

2.3.2 Propiedades expansivas

Desde el punto de vista de la geotecnia, al estudiar un material no basta con conocer su comportamiento mecánico bajo la acción de esfuerzos, sino que también es fundamental saber que sucede en presencia de agua, dado que siempre estará presente en un terreno, y en algunos casos cuando se alcanza la condición de saturación, ésta representa el escenario más desfavorable en la vida útil de una obra fundada en ese lugar.

Para estudiar la expansión y reactividad de la escoria con el suelo se llevó a cabo el ensayo de Potencial de Expansión (ASTM D 4792) y determinación de pH (ASTM D 6276 99a), determinándose mediante el primero de ellos, el hinchamiento producido por las reacciones de algunos compuestos susceptibles a la hidratación.

El ensayo Potencial de Expansión consiste, básicamente, en medir la expansión de volumen de las mezclas compactadas siguiendo los procedimientos generales del método de ensayo CBR (NCh 1852) en cuanto a sus accesorios y método de compactación, pero, utilizando moldes de acero inoxidable. Para acelerar la reacción de hidratación, las muestras se almacenan en agua a $70 \pm 3^\circ\text{C}$ registrando cada 24 horas la deformación vertical experimentada con un deformímetro de 0,01 mm de precisión. Esta prueba se realizó en condiciones de densidad máxima compactada seca y humedad óptima de cada muestra, los parámetros mencionados fueron recuperados de la investigación “*Caracterización de un suelo arcilloso y su mezcla con escoria blanca proveniente de la siderurgia integral*” desarrollada por Leiva (2017) quien estudió las propiedades de compactación de estas mezclas mediante el ensayo Proctor Modificado.

El ensayo se realizó en la sala de curado para mantener constante en todo momento la temperatura y asegurar la hidratación de todas las partículas. Por otra parte, para evitar la pérdida de agua en forma de vapor, se tapó el lugar donde quedaban sumergidas las probetas con una plancha de poliestireno de alta densidad. La sobrecarga utilizada fue de tan solo 2,27 kg en cada probeta. La figura 3 muestra el ensayo en desarrollo con los moldes sumergidos.

La norma ASTM D 4792 relativa al ensayo de potencial de expansión, indica siete días como plazo mínimo para la realización del citado ensayo.



Figura 3: Moldes sumergidos durante ensayo de expansión potencial.
Fuente: Elaboración propia.

Junto con el ensayo de expansión potencial, se ejecutó el ensayo de estimación de pH según ASTM D 6276. El procedimiento descrito en esta norma, se lleva a cabo para estimar la proporción suelo-cal para la estabilización de un suelo, no obstante, para efectos de esta investigación se utilizó escoria blanca (LFS) en lugar de cal.

La metodología es relativamente sencilla, y consiste primeramente, en tamizar el material utilizando la malla N°40, luego el suelo se seca al horno a 100°C. Una vez seco, en recipientes de plástico se añade el suelo y la escoria necesaria para alcanzar los porcentajes estudiados (en relación al peso seco), llegando a un peso total de 25 g. En esta investigación se estudiaron siete porcentajes y un octavo correspondiente a una muestra saturada de escoria, es decir, suelo con: 1%, 3%, 5%, 7%, 10%, 13% y 15% de escoria blanca.

Posterior a esto, se sellan los recipientes utilizando, film plástico y cinta adhesiva y se mezclan por agitación. Posteriormente, se les añade 100 ml de agua destilada a cada una de ellas y, se vuelven a sellar los recipientes y se agitan por un tiempo mínimo de 30 segundos, cada 10 minutos durante una hora. Dentro de los 15 minutos del final del periodo de agitación se determina el pH y la temperatura utilizando un pHmetro. En la figura 4, se observan los recipientes en el desarrollo del ensayo. En último lugar, los resultados se registran y se informa la variación del pH con el contenido en peso de escoria (%).



Figura 4: Muestras de suelo y escoria en diferentes proporciones para determinar su correspondiente pH.
Fuente: Elaboración propia.

3. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presentan y analizan los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio realizados en las dependencias del Laboratorio de Geotecnia de la Universidad Católica de la Santísima Concepción.

Este apartado se compone de dos secciones, en la primera de ellas, se muestran los resultados obtenidos del ensayo compresión simple de las mezclas a diferentes edades de curado para determinar y/o cuantificar las propiedades cementantes, en el caso que éstas lo presenten. En la segunda sección, se presentan los resultados de la estabilidad volumétrica de las mezclas, el que corresponde al ensayo de potencial de expansión. A continuación se presentan los resultados de pH.

3.1 Determinación de pH

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la realización del ensayo según la norma ASTM D 6276, en la cual, se detalla una prueba estándar para estimar el requisito de la proporción de suelo-cal para la estabilización de suelos. En este caso, se siguió el procedimiento explicado en el apartado 2.3.2 utilizando escoria blanca.

En la tabla 2, se aprecian los valores obtenidos, y en la figura 5 se presenta la curva variación de pH a medida que se incrementa el porcentaje de escoria en la mezcla. Como puede observarse, el valor de pH aumenta paulatinamente a contenidos crecientes de escoria blanca.

Tabla 2: Valores de pH y temperatura para los diferentes porcentajes de escoria.

Porcentaje Escoria [%]	Peso seco escoria [g]	pH	Temperatura [°C] T ini: 21,3
1	0,25	4,8	24,8
3	0,75	4,8	25,1
5	1,25	4,8	24,8
7	1,75	4,9	25,2
10	2,5	5	25,2
13	3,25	5,1	25,3
15	3,75	5,3	25,1
100	25	6,7	24,9

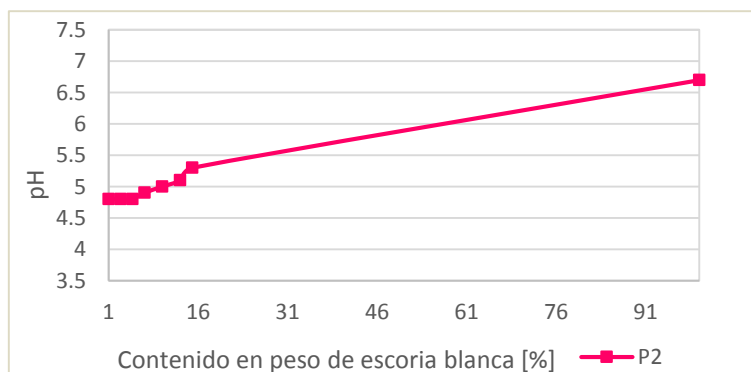


Figura 5: Relación contenido de Escoria blanca-pH.

En la figura 6, se muestra un zoom del primer tramo de la curva para notar con mayor detalle lo que sucede. Es interesante observar que a porcentajes mayores a 5% de escoria la pendiente se incrementa y con porcentajes mayores a 13% se produce un nuevo aumento en la pendiente. Esto parece indicar que el efecto estabilizador de la escoria en el suelo se hace notar a partir de estos porcentajes, sin embargo, el valor de pH se mantiene en el sector ácido (pH bajo 7).

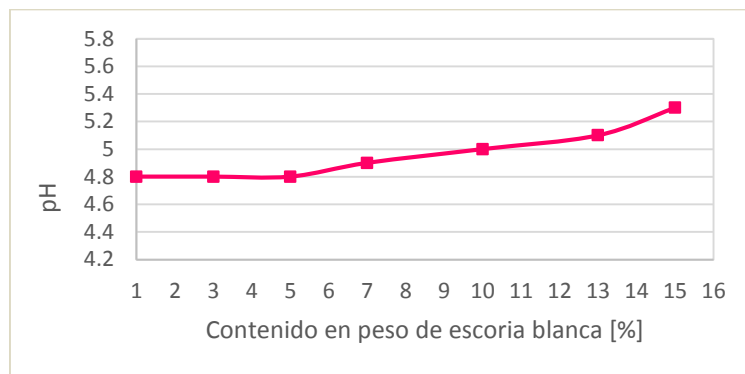


Figura 6: Relación contenido de Escoria blanca-pH (primer tramo).

Con estos resultados, se deduce que habría que tomar en consideración mezclas con porcentajes de escoria blanca del orden de 13% o mayores. Es evidente que este contenido de escoria blanca es muy elevado para considerarlo como una alternativa práctica o económica para una estabilización. Sumado a esto, es posible aseverar que el ambiente producido no es suficiente para asegurar que las reacciones que producirán la cementación del terreno se originen. Esto nos revela que, aunque los porcentajes de escoria estudiados están cercanos a los valores en los que se produce el cambio de pendiente producto del incremento en el valor pH, no se alcanza el valor esperado de pH, que era cercano a 12,4.

Lograr un ambiente alcalino, como se ha mencionado en los criterios empíricos antes expuestos, es de gran relevancia para las condiciones de estabilización, debido principalmente, a que las reacciones puzolánicas, aquellas de las que dependen que el terreno experimente una cementación progresiva en el tiempo, obedecen a la basicidad del ambiente porque sólo así se puede asegurar en mayor o menor medida la solubilidad de la sílice y la alúmina (Ortuño et al., 2000) de la escoria blanca para las reacciones de cementación a largo plazo.

3.2 Estabilidad volumétrica

3.2.1 Potencial de Expansión

El ensayo de potencial de expansión registra el hinchamiento debido a componentes susceptibles de hidratación, tales como óxidos libres de calcio y magnesio. El procedimiento de ensayo fue explicado en el apartado 2.3.2. Este ensayo se ejecutó compactando dos probetas por cada una de las mezclas en estudio (M0, M1, M2 y M3) en el molde CBR (de acero inoxidable) con la energía del Proctor Modificado.

El potencial de expansión de una muestra se determina como la media aritmética de las dos probetas. En la Figura 7, se representan las curvas de evolución temporal de la expansión potencial. El caso a) corresponde a la muestra M0, la situación b) y c) representan las muestras de las mezclas M1 y M2, respectivamente. Mientras que, lo observado en d) pertenece a la muestra M3.

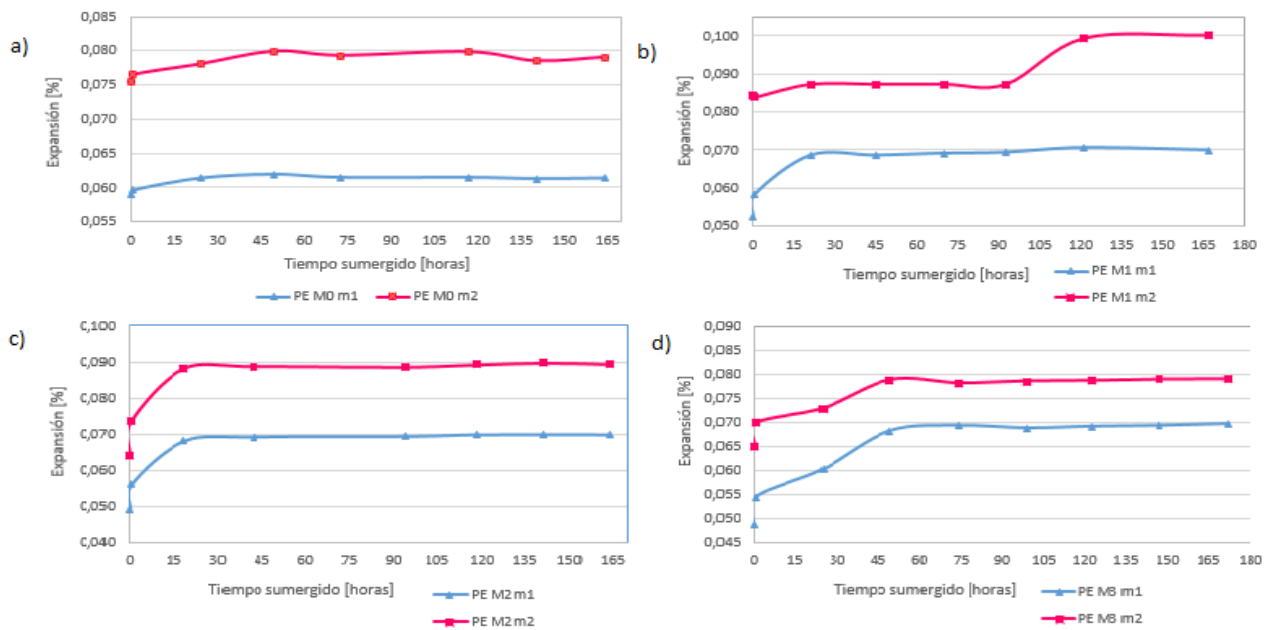


Figura 7: Curvas de evolución temporal de la expansión potencial de las muestras M0, M1, M2 Y M3, en los casos a), b), c) y d), respectivamente.

En el caso a), se aprecia ligeramente que las curvas pueden dividirse en dos partes: en la primera de ellas, se ve una leve expansión inicial relativa a las primeras 49 horas, y, una zona terminal en donde el comportamiento de las curvas es asintótica hacia la expansión potencial final, pese a que ésta es prácticamente inapreciable. Es decir, durante las 115 horas restantes del ensayo, no se aprecian variaciones considerables, o sea, el comportamiento de las muestras es estable.

La variación entre lecturas de hinchamiento es tan pequeña, que la definición de las curvas no es detallada, respecto a esto, habría sido conveniente un mayor número de lecturas de hinchamiento a lo largo del ensayo, pero, dado que esto no se encuentra indicado en la norma ASTM D 4792, no se efectuó.

La expansión inicial, será la comprendida entre las primeras 49 horas de ensayo. En la primera y segunda serie se detectó una expansión inicial de 0,060 y 0,077 %, respectivamente. Desde este periodo en adelante, el incremento diario del hinchamiento se reduce considerablemente. Este resultado era esperable, ya que, el suelo natural no contiene minerales propensos a hidratarse. El ensayo se detuvo a las 168 horas, con un registro de expansión potencial final de la primera y segunda serie de 0,061 y 0,079 %, respectivamente.

En la letra b), se presentan los resultados de la evolución temporal de la expansión potencial de la muestra M1. En el caso de la primera serie se observa claramente que la expansión potencial inicial se produce inmediatamente en las primeras 22 horas de iniciado el ensayo, mientras que en el caso de la segunda serie esta expansión inicial es menos pronunciada, y, entre 92 a 121 horas, se observa un incremento en el hinchamiento. Sin embargo, como los valores del porcentaje de expansión son tan bajos, se considera que estas probetas tienen un comportamiento estable. Así, los valores de expansión potencial inicial para la primera y segunda serie son 0,060 y 0,085 % respectivamente. Mientras que el valor de la expansión potencial final para la primera y segunda serie son 0,070 y 0,099 %.

Por otra parte, en c), se presentan las curvas de la evolución temporal relativa a la expansión potencial durante las 168 horas de ensayo de la muestra M2. Las curvas presentan un claro incremento en el hinchamiento durante las primeras 20 horas de iniciado el ensayo, luego, se comportan de una manera muy estable sin experimentar variaciones en el hinchamiento hasta llegar a la expansión potencial final de las probetas. Los valores de expansión potencial inicial y final de la primera y segunda serie son 0,058 y 0,069 %; y 0,075 y 0,089 %, respectivamente. Desde las 94 horas en adelante, ambas probetas comienzan a reducir su expansión hasta alcanzar un valor asintótico hasta su expansión final.

Finalmente, en d), se observan las curvas de la evolución temporal de la expansión potencial de la muestra M3. Esta muestra, corresponde a la de suelo con 1% de cal, la diferencia promedio de expansión de estas es de un 0,011%, lo que nos indica que la variación de volumen a lo largo del ensayo es muy pequeña. Al igual que todos los casos anteriores, el incremento del hinchamiento se produce en las primeras horas de iniciado el ensayo, presentando una expansión potencial inicial en la primera y segunda probeta de 0,058 y 0,072 %, respectivamente. Luego, el incremento en el hinchamiento es prácticamente nulo, terminando en un valor de expansión potencial final de 0,069 y 0,079 %, respectivamente.

La tabla 3, recoge los resultados del ensayo de Expansión Potencial obtenidos para las probetas de: suelo, mezclas de suelo-escoria blanca y suelo-cal. Todas las probetas alcanzan su expansión potencial final cercanos al tercer día de ensayo, por lo que, transcurrido el tiempo de 7 días de ensayo que indica la norma ASTM D 4792, todas las probetas han alcanzado la estabilización del hinchamiento.

Tabla 3: Resultados del ensayo de potencial de expansión.

	Pot. Exp. 72h [%]	Pot. Exp. Final [%]	Tiem. req. [h]
M0	0,070	0,070	164
M1	0,078	0,085	167
M2	0,079	0,160	164
M3	0,074	0,074	165

En la figura 8, se exponen los resultados del ensayo Potencial de expansión, en cual fue obtenido de la media aritmética de las probetas elaboradas por cada muestra en estudio.

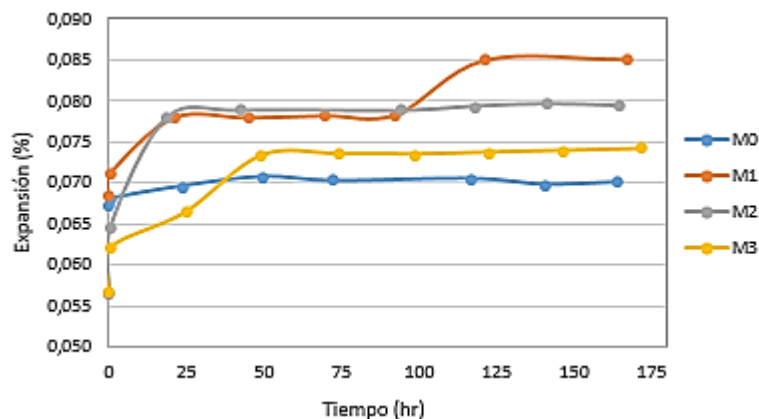


Figura 8: Resultados de la expansión potencial de las mezclas.

De los resultados, se puede apreciar que todas las mezclas tuvieron un comportamiento muy estable, es decir, no experimentaron grandes incrementos en su volumen. Estas consecuencias eran bastante esperables, puesto que, a pesar de que la escoria blanca es en general, un material expansivo, Caballero (2017), quien caracteriza específicamente la escoria blanca ahora estudiada y ensayada, indica finalmente en su investigación que este subproducto no es expansivo. De esto, es posible aseverar que las mezclas presentan una alta estabilidad volumétrica, el hinchamiento experimentado se desarrolla de manera muy paulatina y no representaría grandes deformaciones en el terreno.

A pesar de esto, cabe señalar que la mezcla que experimentó mayor hinchamiento fue la M2, llegando a una expansión potencial final de 0,16 %. No obstante, todos los valores del potencial de expansión final están muy por debajo del 0,5% que indica la norma ASTM D 4792 como límite para indicar que un material es expansivo o no.

Seguido a esto, cabe destacar que, las dos mezclas con escoria blanca investigadas, consiguen su expansión final en primer lugar comparándolas con las mezclas M0 y M3, alcanzando su tendencia asintótica mucho antes de dar por finalizado el ensayo. Esto se debe, en gran parte a la alta temperatura con la que se ejecuta el ensayo, lo que da lugar a que el estudio de probetas con materiales susceptibles a la hidratación, se lleve a cabo en plazos mucho más acotados, puesto que de no ser así, el avance de la hidratación de las partículas se daría de manera muy lenta, pudiendo incluso llegar a tomar meses o años conseguir la hidratación total de sus componentes.

De las razones por las que estas mezclas no experimentan aumentos de volumen, extrayendo la principal de ellas que dice relación con la hipótesis que supone una cementación progresiva del material, pero, ya desechada por considerar el ambiente ácido en el que se encuentran, lo que indica una baja reactividad hidráulica de las probetas que no da lugar a las reacciones de cementación; se extienden dos nuevas explicaciones: la primera de ellas, orientada al tamaño de las partículas de esta escoria, que, al ser tan finas ayudan a retrasar la interacción con el agua y con ello no experimentan hinchamiento. Por otro lado, debido a que las probetas están fabricadas al 100% de los parámetros PM, las mezclas se encuentran en su punto óptimo, o al menos, muy cercano a él, por lo que la alta densidad de las probetas, no permite que sus partículas se reacomoden a una mayor velocidad ni se expandan al no existir vacíos que llenar con el agua que penetra a las probetas.

3.3 Propiedades cementantes

3.3.1 Compresión no Confinada

El análisis de la eventual mejora de las propiedades mecánicas que experimentan las mezclas de suelo y escoria blanca, ha sido desarrollado mediante ensayos de compresión simple a diferentes edades de curado, ciñéndose a la metodología indicada en el apartado 2.3.1. Para ello se fabricaron tres probetas por cada mezcla.

Con el objeto de estudiar la evolución de las propiedades mecánicas se han analizado los resultados de la resistencia a la compresión simple de cada serie de probetas, y, en sus gráficas se ha representado también el error estándar de la media.

Cabe mencionar, que como el interés está enfocado en el estudio de las propiedades mecánicas, tanto de resistencia como deformación de las mezclas, no se puede dejar de considerar la influencia en los resultados del peso específico seco y la humedad de las probetas, por lo que serán variables a considerar en la interpretación de los resultados obtenidos.

En la Figura 9, se presentan las curvas Tensión-deformación (%) de todas las probetas ensayadas para las cuatro mezclas estudiadas en donde se observa la evolución temporal de ellas en las edades de curado analizadas, siendo éstas 0, 7, 28 y 90 días, representadas en los casos a), b), c) y d), respectivamente. En ellas se observan todas las probetas de cada mezcla, M0, M1, M2 Y M3. Además, en la Tabla 4, se exponen todos los resultados del ensayo, en donde se exhiben los valores máximos y medios de resistencia a compresión simple alcanzadas por cada probeta, el contenido de humedad de ellas al momento de la realización del ensayo y el error estándar asociado a cada una de las muestras.

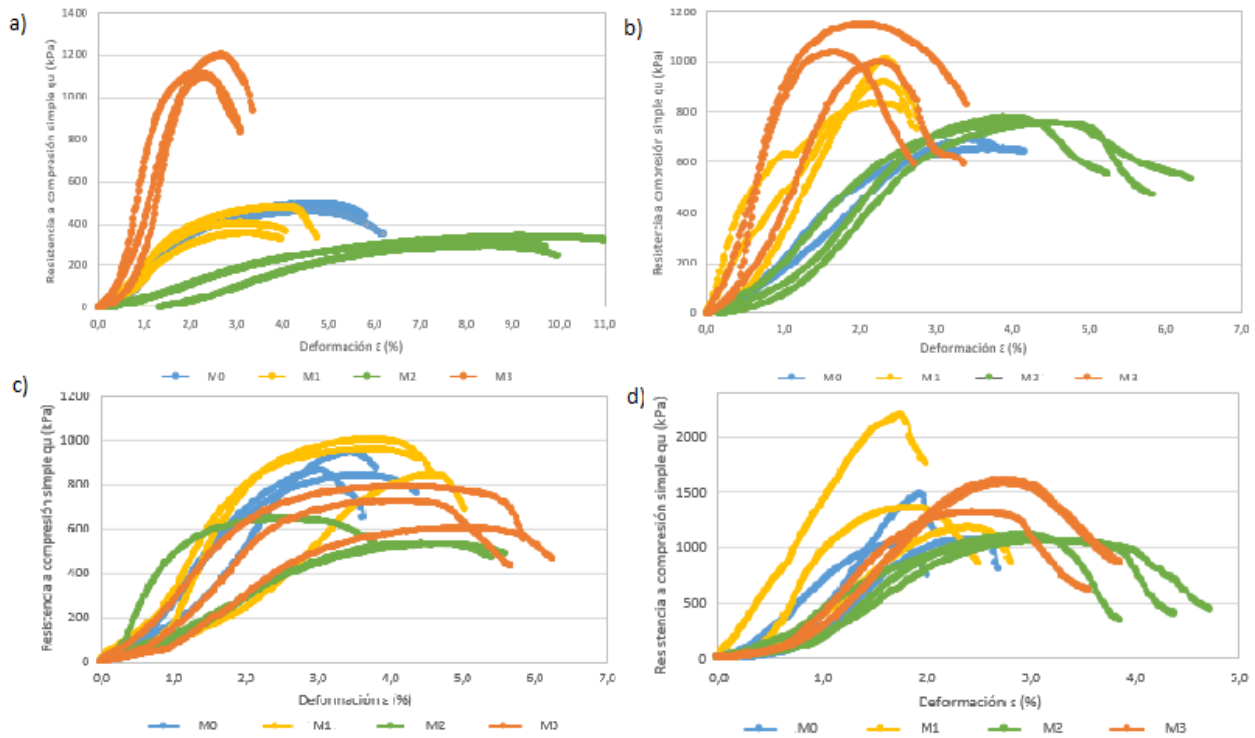


Figura 9: Tensión-deformación de todas las probetas las mezclas M0, M1, M2 y M3. En a), b), c) y d) se representa la edad de 0, 7, 28 y 90 días, respectivamente.

De la figura en general, se puede apreciar claramente cómo la resistencia a compresión simple aumenta con el tiempo de curado. El caso particular de la mezcla M0, no era esperado, ya que, al ser sólo suelo sin ningún tipo de estabilizador químico, se esperaba que la resistencia a compresión simple se mantuviera aproximadamente constante para las diferentes edades de curado. Como el aumento de su resistencia es considerable, no sería válido atribuírselo a las desviaciones propias del laboratorio, sino, que se trataría de un factor más relevante como lo es el contenido de humedad. En la tabla 4, se puede ver que la humedad óptima de esta mezcla es de 18%, sin embargo, al momento del ensayo, éstas probetas llegan al día 90 con una humedad de 17%, por lo que, el incremento en la resistencia a compresión simple se debe a la pérdida de humedad durante la conservación de las probetas. Así, esta mezcla obtiene una resistencia a compresión simple media inicial de 351,9 kPa y alcanza a la edad de 90 días un valor de 612,3 kPa.

El mismo efecto se puede apreciar en la mezcla M3, desde la edad 0 días, presenta una valor de resistencia a compresión simple muy superior al esperado, no obstante al observar la humedad de ensayo, estas probetas son las que mayor contenido de humedad pierden en el transcurso del tiempo de curado, situándose en un valor muy alejado a su óptimo. Cuando la humedad está muy cerca de la óptima, la tensión de rotura baja considerablemente, como se puede advertir en la edad de 28 días (tabla 4).

En cuanto a las mezclas con contenido de escoria, se puede evidenciar que la M1 es la que mejor evolución temporal presenta. Con respecto al contenido de humedad, ésta se mantiene muy cercana a su óptimo, y durante el periodo de curado no sufre grandes pérdidas. En particular, esta mezcla con un 5% de escoria blanca, alcanzó una resistencia a compresión simple inicial de 308,5 kPa, transcurridos los 90 días de la edad de curado obtuvo una resistencia q_u de 834,6 kPa.

Tabla 4: Resistencias a compresión simple máximas para cada probeta y media de las muestras, contenido de humedad al momento de la realización del ensayo CNC y error estándar.

		Edad de curado (días)											
		0			7			28			90		
		PROBETAS											
		P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
M0	RCS máx (kPa)	472,3	492,9	461,8	642,9	656,5	690,9	863,9	839,3	941,7	1074,6	1012,2	1480,0
	Humedad, w (%)	17,650	17,440	17,640	17,600	17,570	17,700	17,120	17,180	17,090	17,340	17,270	17,290
	RCS media \bar{x} , (Kpa)	351,9			430			560			612,3		
	$\bar{x} \pm$ SDOM	351,9 \pm 5,1			430 \pm 10			560 \pm 13			612,3 \pm 22,4		
M1	RCS máx (kPa)	357,8	407,2	479,1	836,0	1011,0	921,6	839,3	955,9	1001,6	1354,6	1177,3	2190,3
	Humedad (%)	19,200	18,950	19,170	17,230	17,280	17,410	18,670	18,580	18,660	17,800	17,720	17,290
	RCS media \bar{x} , (Kpa)	308,5			588,8			589,6			834,6		
	$\bar{x} \pm$ SDOM	308,5 \pm 5,4			588,8 \pm 13,7			589,6 \pm 12,9			834,6 \pm 25,7		
M2	RCS máx (kPa)	297,4	316,7	340,9	756,3	781,6	761,6	529,4	533,2	643,9	1112,7	1053,1	1062,8
	Humedad (%)	18,540	18,040	18,010	17,600	17,920	17,930	18,700	18,610	17,980	16,980	18,330	19,040
	RCS media \bar{x} , (Kpa)	238,4			499,6			398,9			653,1		
	$\bar{x} \pm$ SDOM	238,4 \pm 2,6			499,6 \pm 9,1			398,9 \pm 6,9			653,1 \pm 15,1		
M3	RCS máx (kPa)	1099,7	1118,9	1200,4	997,2	1036,0	1147,1	724,9	789,1	599,0	1316,8	1569,9	1604,9
	Humedad (%)	17,640	17,370	15,980	16,210	16,310	16,100	17,100	17,470	17,610	16,740	17,000	17,600
	RCS media \bar{x} , (Kpa)	714,9			720,7			487,1			838,2		
	$\bar{x} \pm$ SDOM	714,9 \pm 18,5			720,7 \pm 15,1			487,1 \pm 8,2			838,2 \pm 23,4		

En la Tabla 4, se recogen los valores de la media y el error estándar de la distribución de los resultados. Con sus valores e interpretación se podrá determinar qué tan representativos son los resultados obtenidos, considerando entre otros factores, lo ocurrido en las probetas, es decir, la influencia de la humedad en la resistencia a la compresión simple de ellas, sin olvidar, que el foco en estudio se relaciona a estudiar la mejora en la resistencia mecánica de las mezclas debido a sus propiedades cementantes.

Al observar la tabla antes citada, se logra distinguir con claridad que la media de los resultados de resistencia a compresión simple aumenta a medida que lo hace la edad de curado de las probetas ensayadas. Esto es congruente puesto que, ya se observó anteriormente que todas las probetas experimentan junto con la edad un aumento en su resistencia.

La representación gráfica de la resistencia media a compresión simple y error estándar puede verse en la figura 10. En ella observamos lo acotado que es el error al valor de cada resistencia, por lo que los datos son bastante representativos del comportamiento de las probetas a medida que aumenta la edad de curado.

Al inicio de esta investigación, se creía que la mezcla M2, aquella con mayor porcentaje de escoria presentaría la más elevada resistencia a compresión simple, sin embargo, podemos observar que esto no es así. Las resistencias aumentan levemente en presencia de escoria blanca, pero, la evolución que tuvo la mezcla M1, es muy similar a la mezcla suelo-cal.

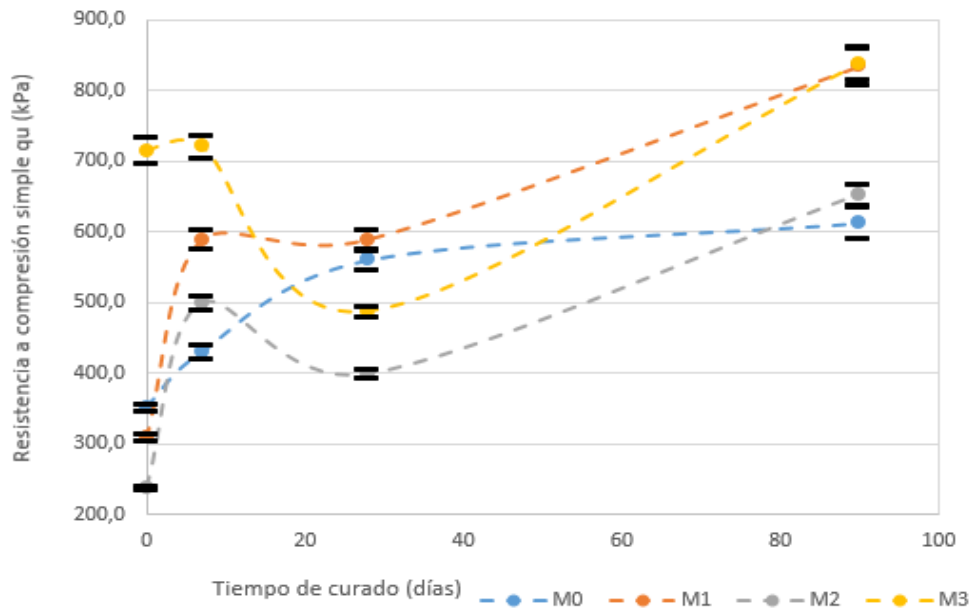


Figura 10: Evolución de la resistencia a compresión simple de las probetas y su error estándar.

En síntesis, es posible advertir una mejora en la resistencia a compresión no confinada en el suelo arcilloso por la adición de escoria LFS, pero no es posible aseverar que este aumento se deba a las reacciones cementantes de la escoria, puesto que, con los resultados obtenidos del ensayo de determinación de pH, no es posible asegurar que las reacciones puzolánicas necesarias para que las mezclas experimenten una cementación progresiva, se lleven a cabo por el ambiente ácido en el que se encuentran, y de generarse, se asume que éstas deben ser muy leves.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación, se exponen los comentarios finales con mayor relevancia, derivados de este trabajo de investigación y ensayos de laboratorio efectuados:

- La evolución temporal del pH se puede interpretar como un índice de la tasa de fijación de la escoria blanca en el suelo, por lo que, de sus bajos valores de pH, se puede decir que la fijación de la sílice, magnesio y alúmina (presentes en la escoria) en el suelo es muy débil, y por ello no se pueden esperar mejoras significativas en sus propiedades geotécnicas y resistentes. Sería factible corroborar estos resultados, con la evolución de la resistencia a compresión simple y obtener el pH de cada probeta, para estudiar si los resultados son coherentes, es decir, a mayor tiempo de curado, por ende mejora en las propiedades resistentes, se logran valores de pH cercanos al esperado de 12,4.
- El valor de pH obtenido fue similar en todos los casos estudiados, pero con valores muy alejados al esperado de 12,4 unidades, este valor corresponde al pH teórico de una solución acuosa de óxido de calcio. Por lo que, vale la pena estudiar cómo potenciar este factor, es decir, activar la escoria blanca y con ello asegurar que las propiedades cementantes que ya se sabe que brindan en un terreno, se produzcan y sea posible considerar este subproducto como una muy buena alternativa de estabilizador químico.
- En cuanto al estudio de las propiedades expansivas, se cree que durante el ensayo de potencial de expansión, se produjeron de reacciones puzolánicas leves, que permitieron que las mezclas en estudio presenten una alta estabilidad volumétrica, sin embargo, los resultados no son concluyentes, por lo que se propone el estudio de la capacidad de hinchamiento de las mezclas a largo plazo, para asegurar que no se producirán hinchamientos que se traduzcan deformaciones peligrosas para el terreno.
- Si bien es cierto, de las mezclas de suelo y escoria LFS se han observado mejoras en la resistencia a compresión simple, no se tiene la certeza, con los datos y resultados de esta investigación que este incremento en sus propiedades mecánicas se deba a la acción de las propiedades cementantes de la escoria. Por lo que se recomienda, profundizar en esta línea investigativa.
- Se confirma la gran influencia que tiene la conservación del contenido de humedad durante el periodo de curado, puesto que, se evidenció que algunas mejoras en la resistencia a compresión simple se debían a la pérdida de humedad experimentada y no necesariamente a las reacciones cementantes de la escoria en el suelo, como es el caso de la mezcla M0, que correspondía sólo a suelo arcilloso.
- Producto de la adición de escoria LFS al suelo arcilloso, se obtienen las siguientes mejoras geotécnicas: aumento en la rigidización de las probetas, es decir, el suelo soporta mayores esfuerzos experimentando menos deformaciones; leves aumentos de la resistencia a compresión simple junto con la edad de curado, con los resultados, no es posible afirmar de manera categórica que la escoria blanca es capaz de evidenciar mejoramientos en las propiedades de desempeño a largo plazo, y finalmente una alta estabilidad volumétrica al no evidenciar hinchamiento.

4. REFERENCIAS

Anastasiou E, Papayianni L, Papachristoforou M (2014). Comportamiento del hormigón autocompactante que contiene escoria de horno de cuchara y refuerzo de fibra de acero.

Arribas I, Vegas I, San José J, Manso J (2014). Estudios de durabilidad en hormigones de escoria siderúrgica.

Asociación mundial del acero, Anuario estadístico de acero 2017.

ASTM D 2166 – Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil.

ASTM D 6276 – Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization.

ASTM D 4792 – Standard Test Method for Potential Expansion of Aggregates from Hydration Reactions.

Caballero, A (2017). Caracterización de la escoria blanca proveniente de la siderurgia integral. Tesis pregrado, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, Chile.

CAP. Memoria anual 2016.

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, Universidad del País Vasco, Bilbao, España.

Kolias S, Kasselouri-Rigopoulou V, Karahalios A (2005). Estabilización de suelos arcillosos con alto contenido de cenizas volantes de calcio y cemento.

Leiva, D (2017). Caracterización en laboratorio de mezclas suelo-escoria blanca de acería (LFS) para utilización en obras viales. Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, Chile.

Maghool F, Arulrajah A, Du Y, Horpibulsuk S, Chinkulkijniwat A (2017). Impactos ambientales de la utilización de agregados de escoria de acero residual como materiales de construcción de caminos reciclados.

Manso J, Ortega-López V, Polanco J, Setién J (2013). El uso de escoria de horno cuchara en la estabilización del suelo.

Montenegro, J (2013). 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, Santander, España.

NCh 1852. Mecánica de suelos – Determinación de la razón de soporte de suelos compactados en laboratorio.

NCh 1515. Mecánica de suelo – Determinación de la humedad.

Ortega-López V, Manso J, Cuesta I, González J (2014). La expansión acelerada a largo plazo de varias escorias básicas de hornos de cucharón y sus aplicaciones de estabilización del suelo.

Ortuño, L, Rodríguez, J (2000). La estabilización del suelo con cal como mejora de suelos. Estudio realizado en el tramo V de la autovía A-381: Jerez-Los barrios.