

## Parámetros resistentes y de deformación en mezclas de suelo y escoria blanca obtenidos por medio de ensayos de corte directo y compresión simple

*R. González Hidalgo<sup>1</sup>, J.M. Montenegro Cooper<sup>2</sup> y P. Lapeña Mañero<sup>3</sup>*

**RESUMEN:** La producción de acero a nivel mundial se ha incrementado desde los años 50 y con ello la producción de residuos y/o subproductos generados a partir de los procesos siderúrgicos. La escoria de horno cuchara es uno de esos subproductos del que existen antecedentes de su mezcla con suelos arcillosos para incrementar las propiedades geotécnicas del material resultante. Esta investigación evalúa las mejoras de mezclas entre un suelo arcilloso y dos porcentajes de escoria blanca (5 y 10% de escoria en peso de suelo seco). Se han efectuado ensayos de compresión simple y corte directo tanto en el suelo solo como en mezclas de este con escoria (porcentajes antes indicados) y cal (1% de cal con respecto al peso de suelo seco). Se han seguido rigurosos procedimientos de fabricación, almacenamiento y ensayo para asegurar la representatividad y repetitividad de los resultados del ensayo de compresión no confinada a 0, 7, 28 y 90 días de curado. Los parámetros resistentes drenados se han determinado del suelo y las mezclas a partir de cinco tensiones normales por muestra mediante el ensayo de corte directo (50, 100, 150, 200 y 300 kPa).

En los resultados se observa que a corto plazo las mezclas con 5% de escoria tienen mayor resistencia a la compresión simple, pero en las mezclas con un 10% de escoria existe una mayor influencia sobre los módulos de deformación en rotura y a 50% de rotura. A largo plazo se obtiene un aumento en el ángulo de rozamiento interno máximo desde 24° en el suelo que incrementa hasta 32° en la mezcla con un 10% de escoria.

**PALABRAS CLAVES:** LFS, mezclas, mejoramiento de suelos.

**ABSTRACT:** The manufacture of steel production has been increased since the '50s in worldwide and also waste material and by-products generated by steelmaking processes. The ladle furnace slag (LFS) is one of those byproducts, some researchers suggest that if it is mixed with clayed soils they will improve their geotechnical properties of this new material. This work assess geotechnical improvements of mixtures between clayey soil and two percentages of LFS (5 and 10% slag by weight of dry soil). Unconfined compression and direct shear tests have been carried out in both soil and mixtures (LFS and lime). Strict manufacturing, storage and testing procedures have been followed to ensure the representativeness and repeatability of the results of the unconfined compression test at 0, 7, 28 and 90 days of curing. The parameters of long-term soil strength and mixtures were determined from five normal efforts per sample, by means of the direct shear test (50, 100, 150, 200 and 300 kPa).

In the results it is observed that in the short term the mixtures with 5% of slag have greater unconfined compression strength, but in the mixtures with 10% of slag there is a greater influence on the modules of deformation in rupture and 50% of breakage. In the long term, an increase in the maximum internal friction angle is obtained from 24° in the soil which increases up to 32° in the mixture with 10% slag.

**KEYWORDS:** LFS, Mixtures, Soil improvement.

---

<sup>1</sup> Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [rgonzalez@ing.ucsc.cl](mailto:rgonzalez@ing.ucsc.cl)

<sup>2</sup> Profesor Guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [jmontenegro@ucsc.cl](mailto:jmontenegro@ucsc.cl)

<sup>3</sup> Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [plapena@ucsc.cl](mailto:plapena@ucsc.cl)

## 1 INTRODUCCIÓN

Un objetivo prioritario de varios líderes y organismos internacionales en las últimas décadas es reducir la contaminación que la especie humana genera y almacena en el planeta. Actualmente se promueve cada vez más la cultura de las tres erres (reciclaje, reducción y reutilización) en relación a la generación y disposición de residuos.

La implementación de políticas medioambientales más estrictas ha llevado al desarrollo de diferentes líneas investigativas en las que se ha conseguido que muchos de los materiales que antes eran considerados desechos y terminaban en vertederos, ahora sean valorizados como subproductos. Entiéndase desecho o residuo como un material que queda al finalizar un proceso y que no tiene utilidad, a diferencia de un subproducto es aquel material que resulta como un producto secundario de un proceso y es la materia prima de otros. La industria siderúrgica no está exenta de generar residuos, entre los que se encuentran las escorias de acería. Estas están presentes en todo el proceso de refinado del acero. Las escorias en un principio eran acopiadas e iban a parar directamente a vertederos, pero debido a las propiedades físico/químicas que algunas de estas poseen, hoy en día la ingeniería les ha encontrado un uso apropiado dándoles un valor agregado, lo que las convierte actualmente en un subproducto de las siderúrgicas y no en un residuo como estaban catalogadas anteriormente. Y otras aún son estudiadas para poder darles un uso apropiado como es el caso de la escoria blanca.

La fabricación de acero se separa en dos etapas principales; metalurgia primaria (en el que se efectúa el proceso de fusión de la colada) y metalurgia secundaria (en la que se realiza el afino de la colada) (IHOBE, 1999). Adicionalmente, el proceso de manufactura del acero se divide en siderurgia integral (aquella que utiliza arrabio como materia prima) y la siderurgia eléctrica (emplea chatarra como materia prima). El primero, emplea tres hornos (horno alto, convertidor al oxígeno y horno cuchara), mientras que el segundo utiliza solo dos (horno de arco eléctrico y horno cuchara) (IHOBE, 1999).

La producción mundial de acero ha aumentado en los últimos sesenta años, habiéndose manufacturado unas 189 millones de toneladas, cifras muy menores de las alcanzadas en 2017 con 1689 millones de toneladas (World Steel Association). Los mayores productores de acero a nivel mundial son, en orden decreciente, los siguientes: China, Japón e India. Existe una relación directa entre la fabricación de acero y la generación de escorias siderúrgicas, es decir, a mayor cantidad de acero manufacturado, mayor volumen de escoria generada.

La producción de acero en Chile se concentra principalmente en dos regiones: Metropolitana (la empresa Gerdau AZA utiliza siderurgia eléctrica) y Biobío (Compañía Aceros del Pacífico -CAP-) fabrica mediante siderurgia integral.

La Compañía de Aceros del Pacífico (CAP) informó que el año 2017 manufacturó 729067 toneladas de acero terminado. Considerando la información de la Tabla 1 (kg de escoria por cada tonelada de acero manufacturado) se puede deducir que la citada empresa generó durante dicho año 21872 toneladas de escoria blanca. El objetivo de la presente investigación es contribuir en el conocimiento para, en un futuro cercano, poder dar un uso ingenieril a una parte de ese material.

Cada horno utilizado en la fabricación de acero genera una escoria diferente, pudiendo encontrarse cuatro tipos diferentes de estas: escoria de alto horno (denominada BFS en el proceso de siderurgia integral), escoria de horno convertidor al oxígeno (denominada también BOF en el proceso de siderurgia integral), escoria ácida de horno de arco eléctrico (denominada EAF en el proceso de siderurgia eléctrica) y escoria de horno cuchara (denominada LFS en los procesos de siderurgia integral y eléctrica) (Setién et al., 2009). En la Tabla 1 se muestran estas cuatro escorias y la cantidad generada en kilogramos por cada tonelada de acero terminado.

Tabla 1: Tipo y cantidad de escoria generada por tonelada de acero terminado. Shi (2004) e IHOBE (1999).

Tipo de escoria	Cantidad de escoria por tonelada de acero manufacturado (kg)	
	Siderurgia integral	Siderurgia eléctrica
BFS	200-250	-
BOF	80-120	-
EAF	-	110-150
LFS	30	20

La composición química y el enfriamiento de la escoria de acero influyen directamente en sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas. Los principales componentes químicos de las escorias de acería consisten en CaO, MgO, SiO<sub>2</sub> y FeO (Shi, 2004). Las proporciones de estos compuestos y la concentración de otros componentes menores cambian de un lote a otro de una misma escoria, incluso dentro de una misma planta de acero. Esto depende de las materias primas, tipo de acero fabricado, condiciones del horno, enfriamiento, entre otros (Wang et al., 2018; Maghool et al., 2017 y Shi, 2004).

La escoria de alto horno puede alcanzar elevados contenidos de óxido de calcio (CaO), lo que puede conferirle propiedades cementantes, además posee una estructura vítrea, la que le permite ser volumétricamente estable (Kim et al., 2016; Shi, 2004).

Las escorias BOF y EAF pueden tener similares composiciones químicas y minerales, siendo los principales óxidos el calcio (CaO) y el hierro (FeO). El tercer óxido más importante de la escoria BOF es el sílice (SiO<sub>2</sub>), mientras que en el caso de la EAF este depende de la composición del acero refinado (Yildirim y Prezzi, 2011). Es por eso que las EAF provenientes de la producción de aceros al carbono son muy similares a las de BOF, pero las EAF resultado de la producción de aleaciones o aceros inoxidables son diferentes, pues tienen un contenido de FeO más bajo y un alto contenido de Cr, lo que lleva a clasificarlas como un desecho peligroso en Estados Unidos y Canadá (Shi, 2004).

Por otro lado, la escoria de horno cuchara al igual que las escorias EAF y BOF tiene un alto contenido de CaO además de MgO, pero se diferencia de estas por un reducido contenido óxido de hierro y por alcanzar una elevada cantidad óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (Yildirim y Prezzi, 2011).

La estabilidad volumétrica de las escorias (EAF, BOF y LSF) es uno de sus problemas más habituales, dado su elevado contenido de cal libre (CaO no hidratada) que al hidratarse produce aumento de volumen. (Wang et al., 2018; Yildirim y Prezzi, 2011; Tossavainen et al., 2007; Shi 2004 y Jucks, 2003). Varios autores señalan la necesidad de efectuar un tratamiento previo a las escorias para reducir y/o evitar su inestabilidad volumétrica (Tossavainen et al., 2007; Shi 2004 y Jucks, 2003).

La utilización de las escorias de acería se ha extendido a varios países, pudiendo nombrarse: Alemania, Australia, Corea del Sur, España y Japón. Las principales aplicaciones de las escorias de acería son: áridos de hormigón y para capas en la construcción de carreteras, adición (o aditivo en función del porcentaje de material añadido) o materia prima de materiales cementantes, estabilización y mejora de suelos arcillosos, fertilizantes, etc (Wang et al., 2018; Maghool et al. 2017; Kim et al., 2016; Manso et al, 2005; Shi, 2004 e IHOBE, 1999). La fracción fina es usada como material de reemplazo en los cementos a base de escoria donde ocupa el rol del material cementante o también como aditivo para mejorar la resistencia y durabilidad del mismo. Por otro lado, la fracción gruesa puede reemplazar al material granular en bases y sub-bases de carreteras. El comportamiento a largo plazo de las mezclas

con escoria y sus ligeras propiedades hidráulicas ha abierto una línea investigativa que establecerá las condiciones adecuadas de su uso. Grupos de investigación de la Unión Europea (Grecia, Italia, Bélgica, Alemania y España) están en permanente contacto con el fin de establecer reglas pre-normativas para el uso de las escorias EAF y LFS en mezclas de mortero, hormigón, bituminosas, incluyendo mortero autonivelante, hormigón proyectado con LFS y hormigón autocompactante con EAF (Santamaría et al, 2016).

En Japón se alcanzó una tasa de utilización del 98.4% en el año 2016, siendo el país con mayor tasa de reutilización de escorias a nivel mundial (Guo et al., 2018). La producción de escoria en ese año fue de 14.1 Mt aproximadamente, en el que un 30.9% se utilizó en aplicaciones civiles, incluyendo mejoramiento de suelos blandos, rellenos de protección costera, terraplenes y carreteras (Guo et al., 2018). Además, en ese país la escoria de acero también se usa para reducir el contenido de sulfuro de hidrógeno en el agua de mar (Guo et al., 2018).

Como se ha dicho con anterioridad, las escorias de alto horno (BFS) son volumétricamente estables, lo que permite su utilización como estabilizante de materiales de construcción de carreteras, áridos para hormigón, agregados de asfalto de mezcla en caliente y material cementante complementario, entre otros. Estos subproductos también se utilizan en la fabricación de cemento, reemplazando una fracción del material puzolánico del cemento. Este reemplazo produce mejora en la resistencia y durabilidad de los materiales resultantes (Wang et al., 2018; Maghool et al. 2017; Kim et al., 2016; Manso et al, 2005; Shi, 2004 e IHOBE, 1999).

En China se fabricó un cemento compuesto de 30% de escoria de alto horno, 30% de escoria granulada molida, 35% de clinker de cemento y un 5% de yeso, durante los años ochenta, el que se comercializó por más de 20 años (Shi, 2004). La principal desventaja del citado cemento era una resistencia inicial menor y tiempo de fraguado mayor. No obstante, alcanzaba mayor resistencia a la abrasión con un menor costo de energía de fabricación y reducción en las emisiones de dióxido de carbono, tenía una mayor resistencia a la compresión a largo plazo y mayor resistencia a los sulfatos en comparación con un cemento Portland convencional (Shi, 2004).

Al igual que la escoria BFS, las escorias BOF y EAF pueden ser valorizadas como árido en mezclas bituminosas o en mezclas de morteros de mampostería como adición sustituta del agente cementante o del árido fino (Rodríguez et al., 2013; Juckes, 2003; Zaragoza et al, 2001 y Geiseler, 1996). Además, existe una línea investigativa donde se analiza el uso de la escoria EAF en filtros de agua para tratamiento de aguas residuales, ya que ayuda a la eliminación de fósforo (Claveau-Mallet et al., 2018).

Otro uso que se les da a las escorias fuera del área de la construcción, es como fertilizantes. En este ámbito, además de proporcionar los nutrientes necesarios para el suelo, corrigen el pH de este (Montenegro, 2013 y Zaragoza et al., 2001).

En la Tabla 2 se muestra la relación entre las características físicas y/o químicas de la escoria y su potencial área de aplicación o uso recopilados de la Nippon Slag Association y Guo et al., (2018). En dicha tabla se observa que la mayor aplicación está en la fabricación de cemento y hormigones, ya sea como materia prima o agregado en mezclas y en la construcción de obras viales, donde actualmente es un sustituto de materiales naturales como arena o grava.

El material que se empleará en esta investigación corresponde a escoria reductora de horno cuchara o escoria de refinación (LFS) o también conocida como escoria blanca, la cual se obtiene en ambos procesos siderúrgicos (integral y eléctrico), al ajustar la composición química del acero se requiere la desulfuración en el horno cuchara, etapa final de refinado del acero (Setién et al., 2009).

Tabla 2: Relación entre las características y aplicaciones potenciales de la escoria de acero.  
 Modificado de Guo et al., (2018) y Nippon Slag Association.

Características	Aplicaciones
Duro, resistente al desgaste, propiedades hidráulicas, poroso y gran ángulo de fricción interna	Agregados para construcciones hidráulica y viales (material de relleno, terraplenes, bases y sub-bases, mezclas asfálticas, capas de drenaje del suelo, etc.).
Poroso y/o alcalino	Tratamiento de aguas residuales y compuestos para vitrocerámicos.
FeOx, componentes de Fe	Recuperación de hierro
Componentes de CaO, MgO, FeO, MnO	Fundente
Componentes cementantes (C <sub>3</sub> S, C <sub>2</sub> S y C <sub>4</sub> AF) en fracción fina	Materia prima de cemento, agregado del cemento portland y aditivo de hormigón.
Componentes de FeO, CaO, SiO <sub>2</sub> y bajo contenido de óxidos de sodio y potasio	Materia prima para el Clinker de cemento
CaO, componentes de MgO	Captura de CO <sub>2</sub> y desulfuración de gases de combustión.
Aislante térmico y efectos de absorción del sonido cuando se hace fibra	Materia prima para lana de roca
Componentes del fertilizante (CaO, SiO <sub>2</sub> , MgO y FeO)	Fertilizante y mejora del suelo.

Los principales óxidos presentes en la LFS son óxido de calcio (CaO) y silicio (SiO<sub>2</sub>) (Shi, 2004). La Tabla 3 muestra los principales óxidos y rangos habituales de estos que pueden encontrarse en una LFS, en la cual se destaca alto porcentajes de óxido de calcio, sílice, alúmina y óxido de magnesio. La cal (CaO) y la periclase (MgO) presentes en la escoria LFS son el principal inconveniente en el uso de esta en la ingeniería civil, debido a su estabilidad volumétrica en presencia de agua. Dicha estabilidad está determinada principalmente por el contenido de cal residual, la que puede provenir de dos posibles fuentes; una corresponde a la materia prima y la otra a la cal precipitada de la escoria fundida (Geiseler, 1996).

Tabla 3: Componentes químicos de la escoria blanca. Modificado de Shi (2004).

Compuesto	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	MgO	MnO	TiO <sub>2</sub>	S	P	Cr
Rango (%)	2-35	5-35	0.1-15	30-60	1-10	0-5	-	0.1-1	0.1-0.4	0-0.5

La periclase, a diferencia de la cal, se hidrata a un ritmo mucho más lento, causando cambios volumétricos significativos durante meses o incluso años (Yildirim y Prezzi, 2011). En general las escorias generadas en la siderurgia por medio de tecnologías modernas tienen un bajo contenido de MgO (Yildirim y Prezzi, 2011).

La expansión se reduce hidratando previamente los compuestos expansivos antes de utilizar la escoria. Esta hidratación se puede realizar posterior a la fase de enfriamiento de la escoria. El enfriamiento puede ser rápido (enfriando con agua, aire comprimido o incluso tierra) o lento (al aire libre) (Tossavainen et al., 2007 y Juckes, 2003). Un enfriamiento rápido permite la formación de vidrio y disminuye el contenido de cal libre. Sin embargo,

un enfriamiento a temperatura ambiente por un tiempo prolongado (lento) permite que toda la cal y parte de la periclasa se transforme en portlandita y brucita respectivamente. Si este proceso de apagado continúa hasta la fase en que la escoria es un material polvoriento que es fácilmente arrastrado por el viento, entonces la expansividad del material será baja (Tossavainen et al., 2007; Manso et al., 2005 y Juckes, 2003).

La cal y la periclasa libres son útiles cuando se combinan con suelos arcillosos debido que ambas reaccionan con la sílice del suelo (Yildirim y Prezzi, 2017) mejorando su capacidad de compactación, capacidad de floculación y reduciendo el hinchamiento en presencia de agua (Manso et al., 2013).

La escoria que se enfría de forma adecuada y tiene una alta basicidad, es decir, una alta relación  $\text{CaO/SiO}_2$  puede exhibir propiedades cementantes (Shi, 2004). Varias investigaciones han demostrado que la escoria blanca se puede usar en obras viales como bases y sub-bases de pavimentos, en estabilización de suelos y construcción de terraplenes gracias a las propiedades resistentes y cementantes que esta posee (Maghool et al., 2017; Ortega-López et al., 2014; Montenegro, 2013; Manso et al., 2005, IHOBE 1999 y Kanagawa y Kuwayama, 1997). En mezclas de mortero contribuye a aumentar la durabilidad y resistencia de este en ambientes salinos (Maghool et al., 2017; Zalar, 2015; Montenegro, 2013; Montenegro et al., 2012; Rodríguez et al., 2013; Manso et al., 2005, IHOBE 1999 y Kanagawa y Kuwayama, 1997).

La escoria LFS aplicada en mezclas con suelos arcillosos mejora las propiedades geotécnicas del suelo, reduciendo el índice de plasticidad (IP) y la expansión, aumenta la resistencia a la compresión simple (CNC), mejora las propiedades de compactación (ensayo Proctor), reduciendo la humedad óptima y aumentando el peso específico seco (Leiva et al., 2017; Ortega-López et al., 2014; Manzo et al., 2013; Montenegro, 2013; Montenegro et al., 2012 y Kanagawa y Kuwayama, 1997). Aumenta el índice de CBR, el cual es inversamente proporcional al valor de hinchamiento libre conforme se aumente el porcentaje de escoria adicionada en la mezcla (Leiva et al., 2017 y Faisal et al., 2017). También, disminuye la cohesión y aumenta el ángulo de rozamiento interno de las mezclas (Faisal et al., 2017).

Las mezclas suelo-cal analizadas por diversos autores fueron en su mayoría comparadas con una mezcla suelo-cal, obteniendo en algunos casos mejoras con la adición de escoria superiores a las que se consiguieron con cal (Leiva et al., 2017; Ortega-López et al., 2014; Manzo et al., 2013; Montenegro, 2013 y Kanagawa y Kuwayama, 1997).

Según Manso et al., (2013) en las mezclas de suelo-escoria se han usado diferentes porcentajes de LFS y este depende de la solicitud del suelo arcilloso en cuestión; ya que para un suelo con arcillas del tipo illita al aplicar un porcentaje de 5% de LFS se obtiene resultados comparables a aplicar un 2% de cal. No así, en el caso de un suelo de arcilla del tipo esméctica, donde se requiere porcentajes mayores de estabilizador.

El presente estudio busca continuar con la línea investigativa de Caballero (2017), Leiva et al, (2017) y Zárate et al., (2018), en los que se caracterizó la escoria sola, las propiedades del suelo y de las mezclas (añadiendo 5 y 10 % de peso seco de escoria blanca al suelo) comparados con resultados de mezclas de suelo con 1% de cal. Los ensayos propuestos buscan obtener los parámetros resistentes y de deformación, tanto a corto como a largo plazo.

Leiva et al., (2017) y Zárate et al., (2018) concluyeron que al añadirle escoria blanca al suelo estudiado se incrementaba la resistencia a la compresión simple a medida que aumenta el tiempo de curado de las probetas. Sin embargo, los citados autores no tuvieron en cuenta la variación del rango de humedad en el momento de fabricación. Barros et al., (2018) propusieron límites de variación máximos que debe de tener una probeta de suelo solo con respecto a la óptima determinada en el ensayo Proctor de referencia para que las probetas de compresión simple alcancen valores de resistencia repetibles y con una variación de resultados aceptables. En este trabajo se

ha utilizado el criterio propuesto por Barros et al., (2018) para aceptar o rechazar una probeta fabricada, y que será tomada en cuenta en los resultados definitivos presentados.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo divide la metodología en dos grandes partes: materiales y ensayos. A continuación se describen de forma general los materiales utilizados.

### 2.1 Materiales

Los materiales empleados en este trabajo son suelo arcilloso, escoria blanca, cal y mezclas entre los materiales antes indicados. A continuación se describirán las principales características de cada uno de ellos.

#### 2.1.1 Suelo

La muestra de suelo se recogió desde el loteo San José del Mar ubicado en el sector de Quebrada Honda, localidad de Punta de Parra, comuna de Tomé, Provincia de Concepción, Octava región, Chile. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra la georreferenciación del punto de donde se extrajo la muestra de suelo.

El material fue almacenado en el Laboratorio de Geotecnia de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, secando el material hasta masa constante en horno eléctrico a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C durante un tiempo mínimo de 24 horas.

Posteriormente, se machaca hasta obtener tamaño natural de sus partículas, dado que frecuentemente se forman grumos o terrones. En este proceso se empleó la máquina de desgaste de Los Ángeles, en la que se hacía girar el suelo durante unos 15 minutos, sin incorporar las esferas de acero usualmente utilizadas en dicho ensayo.

La finalidad de este procedimiento es homogeneizar la muestra y disgregar sus terrones. Luego se procede a machacar mediante martillo de goma el material hasta que pase por el tamiz N° 10 (malla 2 mm).

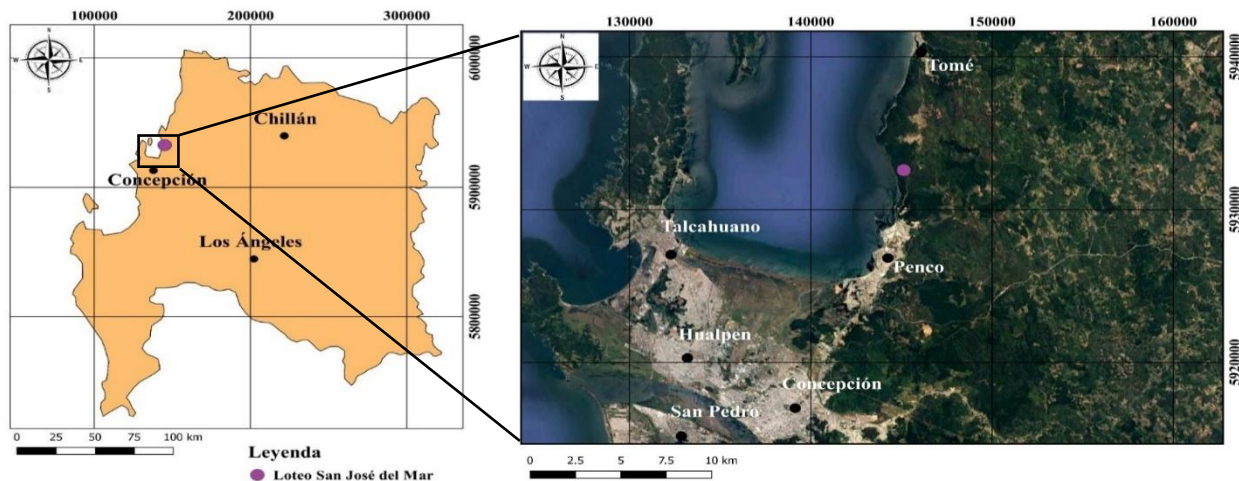


Figura 1: Ubicación del lugar de extracción de la suelo utilizada en las mezclas ensayadas en laboratorio. Coordenadas UTM: 5938021 S y 681264 E. Fuente: Modificado de Google Earth.

El suelo utilizado en esta investigación corresponde a una arcilla roja perteneciente a la meteorización de rocas sedimentarias de la Formación Quiriquina (Biró, 1982 en Quezada, 1996). Esta unidad litológica está formada por una secuencia de origen marino, conformada por areniscas pardas con gran contenido fosilífero y areniscas verdes, ambas de grano fino y edad Cretácico Superior. Por lo general, las rocas de dicha unidad se encuentran meteorizadas y con oxidación de minerales ferrosos, por lo que toman un color rojizo (Quezada, 1996).

Cabe mencionar, que el suelo se atribuye a esta formación debido a que fue posible reconocer algunos fósiles de bivalvos en la muestra que se recogió para esta investigación.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** resume la caracterización del suelo según Leiva et al., (2017). El material presenta un límite líquido de 47% y un límite plástico de 16%, alcanzando un índice de plasticidad de 31%. A partir de esta información y considerando los resultados de la granulometría, este suelo puede clasificarse como arcilla de baja plasticidad (CL) según la USCS (Unified Soil Classification System).

Tabla 4: Principales propiedades de identificación del suelo. Leiva et al., (2017).

LL (%)	47
LP (%)	16
IP (%)	31
Gs	2.65
Clasificación (USCS)	CL

### 2.1.2 Escoria

La escoria blanca utilizada en esta investigación corresponde a una muestra obtenida desde la Compañía de Aceros de Pacífico (CAP), planta Talcahuano.

El citado material fue caracterizado por Caballero (2017), habiendo sido resumidas las principales propiedades geotécnicas de la escoria blanca en la Tabla 5.

Adicionalmente, el citado autor entregó resultados del ensayo de lixiviación (test TCLP-EPA 1311 descrito por la norma NCh 2754/03) efectuado a una muestra de escoria blanca, llegando a la conclusión de que la escoria cumple con lo indicado en la normativa vigente (Decreto Supremo N° 148).

Tabla 5: Principales propiedades de identificación de la escoria blanca. Caballero (2017).

Propiedad	Unidad	Resultado
Clasificación UCSC	-	SM
Gravedad específica	-	2.6
IP	%	NP
$\gamma_{d \min.}$	kN/m <sup>3</sup>	7.1
$\gamma_{d \max.}$	kN/m <sup>3</sup>	10.3
DMCS	kN/m <sup>3</sup>	14.91
$\omega_{opt}$	%	16.5
$CBR_{95}$	%	18
$\phi_{max.}$	°	39
$\phi_{critico}$	°	27
Expansión potencial en CBR	%	0.17-0.23



Grado de colapso ( $I_c$ )	%	0.02 (*)
----------------------------	---	----------

$\gamma_{d\ min.}$ : densidad seca mínima;  $\gamma_{d\ max.}$ : densidad seca máxima;  $DMCS$ : densidad máxima compactada seca;  $\omega_{opt}$ : humedad óptima;  $CBR_{95}$ : índice de CBR al 95 % del ensayo Proctor;  $\varphi_{max.}$ : ángulo de fricción interno máximo;  $\varphi_{critico}$ : ángulo de fricción interno crítico, (\*) ninguno.

Leiva et al. (2017) determinaron la composición química de la LFS mediante el ensayo de fluorescencia de rayos X efectuado sobre una muestra de escoria blanca. La Tabla 6 muestra la composición química de la escoria LFS. Los principales óxidos detectados en este material son de calcio (CaO), sílice ( $SiO_2$ ), alúmina ( $Al_2O_3$ ) y de magnesio (MgO). Previo a la utilización de la escoria, es necesario secar la muestra en horno hasta masa constante a temperatura contante de  $110 \pm 5$  °C y posteriormente se pasa por la malla N° 10, utilizándose en esta investigación el material que atraviesa la citada malla.

Tabla 6: Composición química de una muestra de escoria LFS. Leiva et al, (2017).

Componente	$Al_2O_3$	CaO	MgO	$Fe_2O_3$	MnO	$SiO_2$	$P_2O_5$	S	$TiO_2$	$V_2O_5$	$Cr_2O_3$
%	11.53	38.75	5.03	0.794	0.101	31.68	0.006	0.900	1.714	0.071	0.050

### 2.1.3 Cal

La cal empleada es cal hidráulica, marca Soprocal 6, la cual cumple las normas chilena (NCh 1928 y NCh 2256/1). Según la ficha técnica del fabricante, corresponde a un material de origen natural que se obtiene de la calcinación de la calcita ( $CaCO_3$ ). Se denomina cal hidráulica porque además del hidróxido de calcio posee componentes hidráulicos como  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  entre otros.

### 2.1.4 Mezclas

Las muestras estudiadas en este trabajo corresponden a mezclas entre el suelo y la escoria, así como una combinación binaria del primero con cal. Esta última mezcla se utiliza como medida de comparación de los resultados obtenidos en la mezcla suelo-escoria. Los porcentajes añadidos de cal y escoria corresponden a porcentaje de peso seco del suelo. En la Tabla 7 se presenta la nomenclatura utilizada para referirse tanto al suelo (M0) como a las diferentes mezclas de éste con 5% (M1) y 10% de escoria, así como una mezcla de aquél con un 1% de cal (M3).

Tabla 7: Porcentaje en peso seco de cada componente de las mezclas suelo-escoria y suelo-cal y su correspondiente notación.

Código muestra	Suelo (%)	Escoria (%)	Cal (%)
M0	100	-	-
M1	95	5	-
M2	90	10	-
M3	99	-	1

*M0: suelo solo; M1: suelo con un 5% de escoria; M2: suelo con un 10% de escoria; M3: suelo con un 1% de cal.*

La mezcla binaria de materiales se efectuó mediante máquina mezcladora (ver Figura 2) para asegurar una adecuada homogeneidad de las mezclas suelo-escoria y suelo-cal. El procedimiento comienza pesando la cantidad de suelo y escoria, ambos secos, los que se incorporan a la mezcladora durante un tiempo de 5 minutos. Finalizado

el tiempo de mezclado, se coloca la mezcla resultante en un recipiente para añadir el agua necesaria para alcanzar la humedad de fabricación.



Figura 2: Máquina mezcladora

Las condiciones de estado que se quieren reproducir para estudiar las propiedades resistentes y de deformación son en peso específico correspondiente a la Densidad Máxima Compactada Seca (DMCS) y la humedad óptima ( $w_{opt}$ ) determinadas en el ensayo Proctor modificado por Leiva et al. (2017). En la Tabla 8 se muestran los resultados del ensayo Proctor modificado obtenido por los citados autores. La humectación de las muestra de suelo y de las mezclas se efectuó con espátula metálica, revolviendo la muestra durante un tiempo de entre 5 a 10 minutos.

Tabla 8: Resultado del ensayo Proctor modificado obtenido por Leiva et al. (2017).

Mezcla	DMCS ( $kN/m^3$ )	$w_{opt}$ (%)
M0	17.35	18
M1	17.68	17
M2	17.78	17
M3	17.30	19

DMCS: Densidad máxima compactada seca,  $w_{opt}$ : humedad óptima

## 2.2 Ensayos

Las propiedades de resistencia y de deformación de las mezclas de suelo y escoria han sido evaluadas mediante ensayos de compresión simple y corte directo. El primero se utiliza para evaluar la mejora de la resistencia al corte sin drenaje (corto plazo) a medida que aumenta el tiempo de curado de las probetas, mientras que el segundo se utiliza para determinar la mejora en el ángulo de rozamiento interno y cohesión de las mezclas (largo plazo).

Adicionalmente se ha utilizado una muestra patrón para comparar los resultados obtenidos con las mezclas de suelo y escoria. Esta muestra patrón corresponde a una mezcla de suelo con un 1% de cal hidráulica.

Para asegurarnos de la idoneidad y característica de la cal, se ha determinado el porcentaje de portlandita y calcita para explicar algunos resultados.

### 2.2.1 Determinación del porcentaje de portlandita y calcita de la cal hidráulica utilizada

El componente más importante en la cal es el porcentaje de CaO libre (óxido de calcio disponible para reaccionar químicamente). Cuando no se cumple con los requisitos de almacenamiento especificados para conservar la calidad del producto, ocurren procesos como la carbonatación, donde la CaO libre entra en contacto con el CO<sub>2</sub> y humedad del aire formando calcita (CaCO<sub>2</sub>) y portlandita (Ca[OH]<sub>2</sub>) respectivamente, los que producen un envejecimiento en la cal y por ende un deterioro de las propiedades activas.

Una forma de saber si está envejecida es someterla a diferentes temperaturas a las cuales se consigue la descomposición de estos minerales (portlandita y calcita).

Las temperaturas escogidas son las que nos permiten determinar la humedad higroscópica (100 °C), la descomposición de la portlandita (420-500 °C) y de la calcita (680-750°C). A estas temperaturas ocurre una pérdida de masa por liberación de H<sub>2</sub>O en la humedad higroscópica y la portlandita (Ca[OH]<sub>2</sub>), en el caso de la calcita se libera CO<sub>2</sub> (Montenegro, 2013).

La humedad de la cal se determinó dejando 2 muestras de esta en un horno eléctrico a 110 °C por 24 horas, comprobando después que se había llegado a masa constante tras este tiempo. En el caso de la portlandita y calcita, debido a la temperatura requerida para la descomposición de estas, fue necesario usar un horno mufla facilitado por el laboratorio de química de la Facultad de Ciencias de la Universidad Católica de la Santísima Concepción.

Las mismas muestras con las que se determinó la humedad se calentaron en la mufla a 550 °C por 2 horas aproximadamente, luego se enfriaron en desecador y se registró la pérdida de masa. Un procedimiento similar fue aplicado a otras 2 muestras de la misma cal, en este caso fueron calentadas a 850 °C por alrededor de 6 horas.

La finalidad de someter a la cal a diferentes temperaturas es obtener el contenido de carbonato de calcio y por ende el porcentaje de CO<sub>2</sub> presente en el material para poder contrastarlo con el máximo exigido por las normas NCh 1928 y NCh 2256/1 para una cal hidráulica.

### 2.2.2 Compresión simple

El ensayo de compresión simple -o también denominado compresión no confinada- se ha efectuado siguiendo la norma ASTM D 2166. El ensayo consta tres fases: elaboración, curado y rotura. Las probetas fabricadas corresponden a probetas cilíndricas remoldeadas de 50 mm de diámetro y 100 mm de alto.

El procedimiento de compactación de las probetas empleado en este trabajo es el propuesto por Barros et al. (2018), consistente en preparar la mezcla necesaria para elaborar 3 probetas a idénticas condiciones de estado (contenido de humedad y peso específico seco). En este caso, dichas condiciones son las correspondientes al óptimo determinado en el ensayo Proctor modificado de cada una de las muestras (ver Tabla 8; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

El peso total de la probeta se separa en 5 capas de igual masa. El molde debe estar limpio y seco, así como recubierto por vaselina, para evitar que el suelo se pegue a las paredes de este en el momento en el que se efectúe su extracción. En el interior del molde se introduce el peso correspondiente a la primera capa y, con la ayuda de un pisón metálico y una gata hidráulica, se compacta dicha capa hasta alcanzar la marca correspondiente a una altura igual a un quinto de la altura de la probeta. Posteriormente, se escarifica y se procede de la misma forma con cada una de las capas siguientes cuatro capas hasta alcanzar la altura total de la probeta. En el momento de desmoldar la probeta se debe tener la precaución de que ambas caras de ellas queden paralelas.

El control de la humedad en el momento de la fabricación, así como en el momento de su rotura, se realizó mediante muestras del contenido de humedad. En el caso de que la humedad se alejara más de 0,2% del porcentaje óptimo de la serie fabricada, la probeta era descartada. Este procedimiento de control ha sido explicado en mayor detalle por Barros et al., (2018). La influencia del porcentaje de humedad en la fabricación de las probetas en los resultados resistentes de las probetas también se ha demostrado en la presente investigación.

Cabe destacar que para 0, 7 y 28 días de curado se realizaron 2 tandas por vez (3 probetas por tanda), repitiendo en caso de ser necesario una vez que se tenían los resultados de los ensayos y su humedad de ensayo. En el caso de las probetas de 90 días de curado se realizaron entre 3 a 4 tandas de probetas por mezcla, sin posibilidad de repetir.

En este trabajo se confeccionaron en total 248 probetas de compresión simple (65 corresponden a M0, 60 a M1, 57 a M2 y 66 a M3) de ese total solo 57 cumplieron con el requisito indicado anteriormente. Es decir, un 23% de las probetas confeccionadas alcanzaron una diferencia con respecto a la humedad óptima igual o inferior a 0.2% en el instante de la rotura, dejando el porcentaje restante (77%) fuera del análisis posterior.

Finalizada la etapa de compactación, se procede a proteger las probetas de la pérdida de humedad envolviendo la superficie de las probetas con Parafilm M®. Este producto impermeable con parafina evita la pérdida de humedad durante el curado de las probetas, las que se almacenaban en el interior de cajas plásticas en la cámara húmeda durante este periodo (ver Figura 3). En este trabajo las probetas fueron curadas durante 0, 7, 28 y 90 días desde el día de su compactación.



Figura 3: Almacenamiento de las probetas en el interior de cajas plásticas en la cámara húmeda para efectuar el periodo de curado.

El equipo empleado en la fase de rotura del ensayo es el multiaxial Humboldt, perteneciente al Laboratorio de Geotecnia de la Universidad Católica Santísima Concepción. El ensayo consiste en aplicar sobre la probeta una velocidad de avance de uno de los platos de la prensa constante (deformación controlada) en la que se registra la tensión que soporta la muestra hasta alcanzar la rotura. La velocidad de avance de la prensa se estableció en un

2% de la altura inicial de la probeta por minuto. En general se alcanzó una deformación de entre 2 y 3 por ciento en la fase de rotura dependiendo de la mezcla.

Los resultados del ensayo de compresión simple se analizaron mediante la gráfica tensión axial ( $\sigma$ ) con respecto a la deformación unitaria ( $\epsilon\%$ ). Al momento de efectuar el ensayo, se observó un incremento mayor en la deformación axial que en la tensión normal, pudiendo observarse una curva cóncava en la primera parte de esta. Este efecto evidenciaba una inadecuada aproximación de los platos de la prensa a la probeta. Por lo tanto, en el momento de comenzar el ensayo, la primera parte de la curva tensión con respecto a la deformación correspondía al acomodamiento del plato de la prensa con la probeta y no a la respuesta íntegra de esta última. Para eliminar esta parte de la curva, se corrigió cada una de las probetas, asumiendo que en esa primera parte debiera existir una relación lineal. En cada una de las probetas se obtuvo la resistencia a la compresión simple ( $q_u$ ), el módulo de deformación en rotura ( $E_{rot}$ ) y el módulo a una tensión igual a la mitad de máxima alcanzada en el ensayo ( $E_{50\% rot}$ ), los dos últimos por medio del método secante.

### 2.2.3 Corte directo

El ensayo de corte directo consolidado drenado (CD) se efectuó mediante el procedimiento descrito en la norma ASTM D 3080-03. El ensayo consta de cuatro fases; elaboración, saturación, consolidación y corte.

El ensayo consiste en cortar por un plano horizontal predeterminado una probeta, en este caso cuadrada de 100\*100 mm y espesor aproximado de 30 mm, que se encuentra restringida en sus caras laterales por las paredes rígidas de una caja metálica y sometida a una tensión normal al plano de corte. Como se trata de un ensayo consolidado drenado, la tensión normal se aplica permitiendo el drenaje de la muestra hasta que ocurra la consolidación primaria, para luego romper la probeta a una velocidad tal que no se generen sobre-presiones intersticiales, en el caso de materiales arcillosos esta velocidad es muy lenta.

El procedimiento para fabricar la probeta consiste en preparar una mezcla con el material seco y agua necesarios para alcanzar un 98% de la DMCS del ensayo Proctor modificado (ver Tabla 8), puesto que esa fue la máxima densidad alcanzada de manera manual para las mezclas con escoria.

La masa total de la probeta se separó en un número impar de capas (5, para que la unión entre ellas no coincidiera con la superficie de falla al momento del corte) de igual masa para conseguir el peso específico. En el molde seco y con su piedra porosa basal, se introduce la primera capa para compactarla con la energía suficiente para que esta ocupe un quinto de la caja, se escarifica la superficie y se procede a agregar la capa siguiente repitiendo el mismo proceso para las capas restantes, compactada la última capas se coloca la piedra porosa y se pesa la probeta y el molde.

El equipo utilizado en esta investigación corresponde a un equipo de Corte directo Humboldt computarizado que utiliza el programa Humboldt Material Testing Software (ver Figura 4)

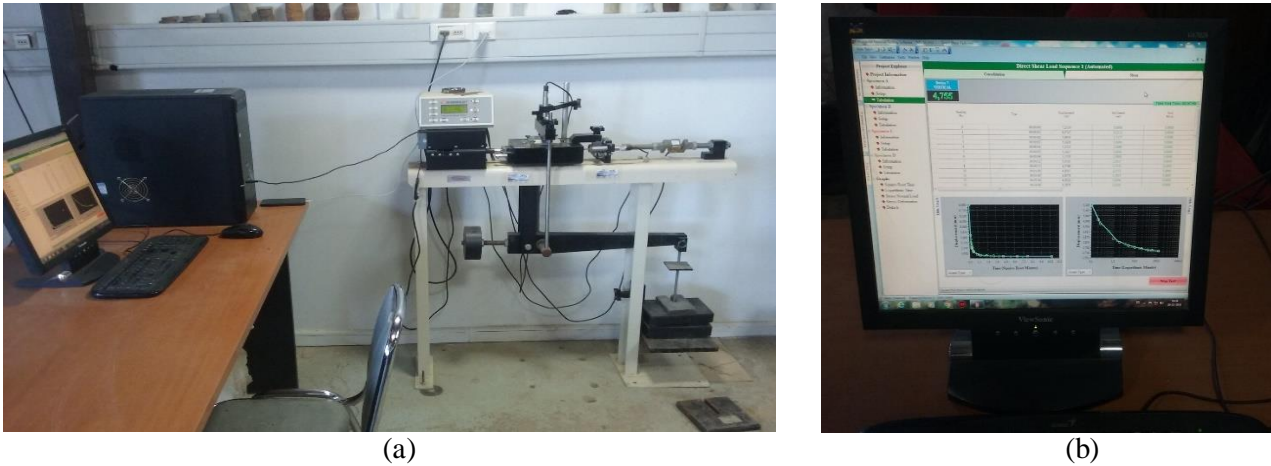


Figura 4: (a) Equipo de corte directo computarizado. (b) Software en etapa de consolidación del ensayo.

El molde con la probeta se monta dentro de la caja de la máquina de corte, una vez montada se inunda la probeta con el agua suficiente para cubrir todo el molde y se deja saturar por un mínimo de 24 horas. Una vez transcurrido el tiempo de saturación se ejecuta el software, eligiendo la opción de “Direct Shear” y se configura para realizar la fase de consolidación para agregar la carga de la tensión normal a la que se realizara la rotura. En este caso se dejó consolidar por un tiempo de 4 horas.

Finalizada la etapa de consolidación, se deben llenar las condiciones para iniciar el corte las cuales corresponden a intervalos de lecturas, condición de inicio, condición de detención y velocidad de avance que es este caso corresponde a 0,02083 mm/min lo que equivale a un tiempo aproximado de 12 horas de ensayo. Una vez completado el ensayo se debe retirar la probeta y determinar su humedad.

En esta investigación las tensiones normales a las que fueron sometidos los diferentes especímenes fueron de 50, 100, 150, 200 y 300 kPa.

Finalmente, con los resultados obtenidos del ensayo se analizan las gráficas de Esfuerzo de corte con respecto al Desplazamiento horizontal ( $\tau$ - $\epsilon_h$ ), Esfuerzo de corte respecto a la Tensión normal ( $\tau$ - $\sigma$ ) y desplazamiento vertical respecto al desplazamiento horizontal ( $\epsilon_v$ - $\epsilon_h$ ) determinando los valores de los parámetros a largo plazo  $\phi_{máximo}$  y  $\phi_{crítico}$  (ángulo de rozamiento interno máximo y crítico) la cohesión (c) y la dilatancia ( $\psi$ ) del material. Cabe destacar que no se realizó corrección por área de las curvas.

### 3 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente apartado se presentan los resultados y se efectúa el análisis de los mismos. A continuación se comenzará con los resultados de los ensayos de compresión simple.

#### 3.1 Porcentaje de portlandita y calcita de la cal hidráulica utilizada.

En el ensayo para determinar el porcentaje de portlandita y calcita en la muestra de cal, mediante la pérdida de masa por descomposición, se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 9. Aquí se entrega la pérdida de

masa para cada muestra a su respectiva temperatura y el promedio, además de la diferencia de pérdida de masa ocurridas para los rangos de temperaturas 110-550 °C y 550-850 °C los que corresponden al 5 y 23.8 % respectivamente.

Tabla 9: Resumen de los resultados obtenidos para las temperaturas a las que se sometió la cal.

Temperatura (°C)	110		550		850	
Muestra	a	b	a	b	a	b
Masa inicial (g)	10.32	7.88	10.1	8.0	10.0	10.0
Masa final (g)	10.17	7.7	9.67	7.31	7.63	1.67
Pérdida de masa (%)	1.47	2.34	4.45	9.44	31.06	30.38
Promedio (%)	1.91		6.95		30.72	
$\Delta$ pérdida de masa (%)	5.04			23.77		

$\Delta$ : es la diferencia de masas entre las temperaturas a las que ocurre la reacción.

Con los resultados de la Tabla 9 y sabiendo las respectivas masas molares de los compuestos (Tabla 10) se puede determinar la masa en porcentaje de portlandita y calcita presentes en la cal.

Tabla 10: Pesos molares de los compuestos presentes en la cal usada.

Compuesto	Fórmula química	Peso molar (g/mol)
Portlandita	Ca(OH) <sub>2</sub>	74
Oxido de calcio	CaO	56
Agua	H <sub>2</sub> O	18
Calcita	CaCO <sub>3</sub>	100
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	44

Los minerales calcita y portlandita se descomponen a diferentes temperaturas, liberando dióxido de carbono y vapor de agua. Como la pérdida de masa que ocurre a los 110 °C corresponde a la humedad absorbida por la cal del ambiente, no se calcula esa pérdida y solo se calcula para la portlandita y calcita resumidos en la Tabla 11.

Como puede verse en la Tabla 11, la calcita es el compuesto más abundante en la muestra de cal ensayada con un 54 % del peso total de la muestra. La cal también contiene otros elementos, como el óxido de calcio, pero no se conoce la proporción exacta de estos, por lo tanto, no es posible saber cuál es el porcentaje de CaO libre que hay en la cal usada. Lo que sí se puede saber es el porcentaje de CO<sub>2</sub>, que en la muestra ensayada fue del 23.8%, por encima del 8% que marca la norma NCh 1928 para la cal hidráulica, por lo la cal usada en la muestra patrón no cumple con lo exigido por la normativa vigente, ya que se encuentra carbonatada.

Tabla 11: Resultados de peso en porcentaje de los compuestos en la cal.

Compuesto	Fórmula química	Peso en % del compuesto en la cal
Portlandita	Ca(OH) <sub>2</sub>	16.4
Calcita	CaCO <sub>3</sub>	54.0
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	23.8

### 3.2 Ensayo de Compresión Simple

Dado el elevado número de probetas de compresión simple que no cumplieron con el criterio de aceptación ( $\pm 0.2\%$  de la  $w_{opt}$  obtenida en el ensayo Proctor modificado) propuesto por Barros et al., (2018), que se decidió analizar los resultados de todos los ensayos de compresión simple obtenidos. Es decir, se han considerado tanto aquellas probetas que alcanzaron una humedad dentro del rango de 0.2 % alrededor de la óptima obtenida en el ensayo Proctor modificado, como aquellas descartadas para el análisis posterior, dado que no cumplían con el criterio propuesto por Barros et al. (2018).

A continuación se analiza la influencia de la humedad en los resultados de resistencia a la compresión simple ( $q_u$ ).

#### 3.2.1 Influencia de la humedad en las propiedades resistentes

La cantidad total de probetas de CNC elaboradas y ensayadas (M0, M1, M2 y M3) fueron 248, de ellas 65 son de la mezcla M0, 60 de M1, 57 de M2 y 66 de M3, de las cuales, sólo 16 M0, 13 M1, 16 M2 y 12 M3 alcanzaron una humedad dentro de la tolerancia fijada para este estudio.

La necesidad de cumplir con este criterio de aceptación está dada con el fin poder afirmar que el aumento en la resistencia a la compresión simple en las mezclas suelo-escoria se debe al efecto de la escoria añadida y no a la variación de humedad en las probetas al momento de la rotura.

Barros et al., (2018) concluyen que la resistencia aumenta cuando las probetas se alejan de la humedad óptima por el lado de la rama seca. Esto también quedó demostrado en este estudio y se puede apreciar en la Figura 5.

En la Figura 5 se muestra la resistencia a la compresión simple y el contenido de humedad al momento de la rotura de todas las probetas fabricadas para la mezcla suelo-escoria al 5 % a las edades de 0, 7, 28 y 90 días de curado (incluye las que no cumplen el criterio de aceptación).

La relación que existe entre el contenido de humedad y la variación en la resistencia se da en todas las series y los incrementos en la resistencia a la compresión simple debido a la humedad son muy parecido.

Se debe tener en cuenta que para la mezcla M1 la humedad óptima es del 17% y está representada por la línea segmentada en cada una de las gráficas en la Figura 5. El rango de humedad que se presenta en dicha figura está entre 15 y 18%. Como corresponde a una mezcla suelo-escoria, existe un aumento de la resistencia con respecto al tiempo de curado que se asocia a la mejora del suelo, que puede observarse en el aumento de la resistencia a medida que aumenta el tiempo de curado, desde resistencias de 650 kPa para 0 días de curado hasta 870 kPa para 90 días de curado.

Pero si se observa cada una de las gráficas de la Figura 5 por separado, se puede observar también que cuanto más se aleja la humedad de la probeta con respecto al óptimo por el lado de la rama seca, la resistencia de esta aumenta de manera significativa; no así por el lado de rama húmeda donde la resistencia a la compresión simple disminuye.

Una variación de 0.5% por debajo de la humedad óptima produce un incremento en la resistencia a compresión simple de aproximadamente 100 kPa, este incremento ocurre en todas las series, independientemente de la edad de curado que esta tenga, se producen incrementos similares.

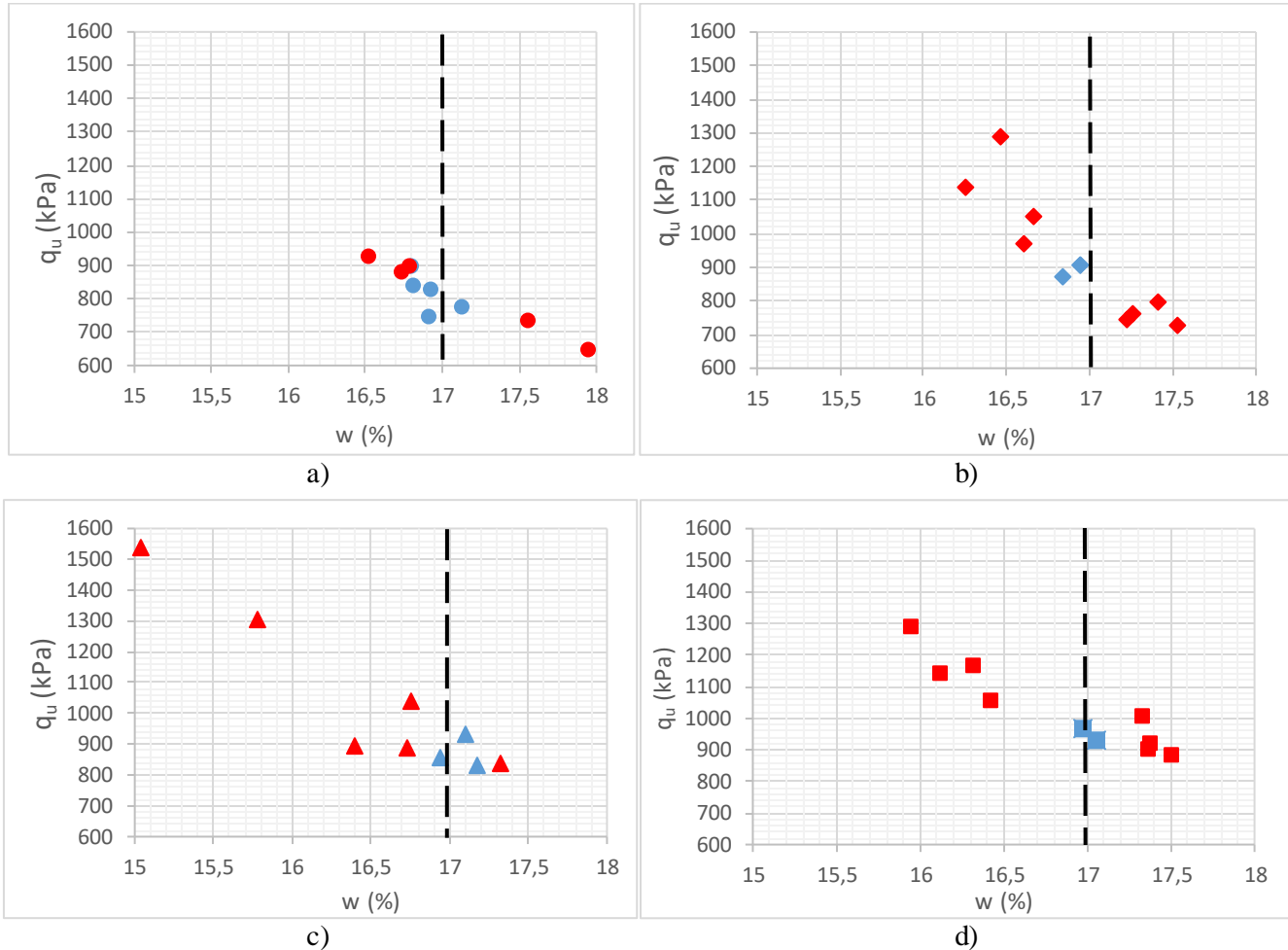


Figura 5: Variación de la resistencia a la compresión simple en kPa ( $q_u$ ) con respecto a la humedad en % ( $w$ ) de la mezcla suelo escoria al 5% (M1) a sus respectivas edades de curado. La línea segmentada representa la humedad óptima de la mezcla. a) M1 a 0 días de curado, b) M1 a 7 días de curado, c) M1 a 28 días de curado y d) M1 a 90 días de curado. Los valores en color azul representan las probetas que cumplen con el criterio de aceptación y en rojo las que no cumplen.

Dejando en claro la influencia de la humedad de fabricación en los resultados, se procede a realizar el análisis de la eventual mejora de las propiedades mecánicas del suelo al adicionar escoria blanca.

### 3.1.2 Evaluación de las propiedades resistentes y de deformación

El análisis de la resistencia a la compresión ( $q_u$ ) y los módulos de deformación en rotura ( $E_{rot.}$ ) y deformación a 50% de la rotura ( $E_{50\% rot.}$ ) se hace de aquellas probetas que cumplieron con el criterio de aceptación por humedad en el momento de la rotura. Para el análisis se consideraron los resultados de tres probetas que cumplieran con el criterio para cada tiempo de curado. En aquellas ocasiones en que existían más de tres probetas que cumplieran con el criterio de aceptación se eligieron las que estuviesen más cercanas a la humedad óptima correspondiente.

Se debe destacar que para la serie M1 a 90 días de curado se analizó el resultado de dos probetas que cumplieron con el rango de humedad, ya que dado el acotado tiempo disponible para la realización de esta investigación, no fue posible obtener una tercera probeta.

En la Figura 6 se muestra la variación temporal de la resistencia media a la compresión simple alcanzada por cada una de las 4 series (M0, M1, M2 y M3) y su respectivo error estándar asociado, además de las curvas de humedad media de las probetas analizadas en cada serie (ver Figura 6, gráfica lado derecho), donde vemos que la variación media es

La serie que representa al suelo solo, M0, debiese tener un comportamiento lineal constante a lo largo del tiempo ya que no se le añade ningún componente que presente evolución alguna a lo largo del tiempo como en el caso de M1, M2 y M3. Sin embargo, en la Figura 6 se observa que la mezcla M0 tiene un  $q_u$  promedio de 791 kPa a 0 días, este incrementa a un poco más de 75 kPa a los 7 días y luego decae hasta 753 kPa el día 28, resistencia que tiende a mantenerse hasta el día 90 solo ha disminuido 16 kPa con respecto a la resistencia a 28 días de curado. Si bien se aprecia una variación en la resistencia en los primeros días, también se debe tener en cuenta el error estándar asociado a estas ya que es bastante alto, por lo tanto el comportamiento normal del suelo debería ser como ocurre entre las edades de 28 y 90 días.

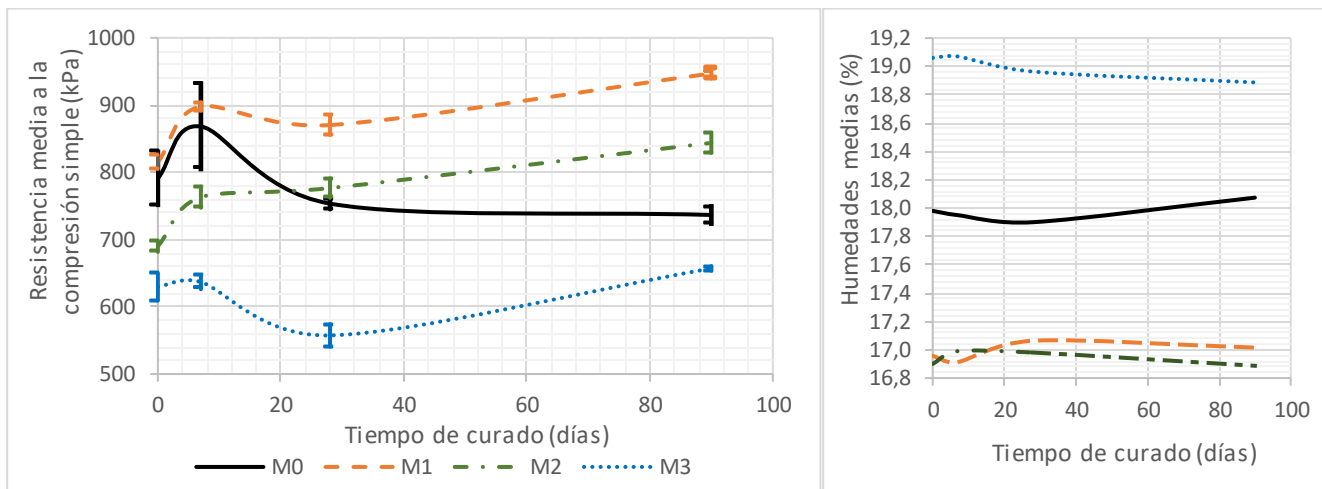


Figura 6: Variación temporal (días) de la resistencia media a la compresión simple (kPa) y variación media de la humedad de las probetas ensayadas de las mezclas M0, M1, M2 y M3.

Las mezclas de suelo con un 5 % de escoria, M1, inician con una resistencia media a la compresión simple sobre los 800 kPa a 0 días. Al igual que la mezcla M0 presenta un incremento a los 7 días de curado de 83 kPa y una disminución de 28 kPa los 28 días con respecto a la edad de 7 días, siendo esta disminución muy inferior que en el caso de la muestra M0. Pasado el día 28 se observa un incremento nuevamente y la resistencia alcanzada a los 90 días de curado de casi 950 kPa, 200 kPa superior a la muestra M0 con idéntica edad.

La serie M2, que corresponde a la mezcla con un 10 % de escoria, presenta un aumento final en la resistencia media a la compresión simple, siendo en este caso la resistencia inicial aproximadamente 100 kPa inferior a la del suelo sin mejorar. Esta serie, al igual que las 2 anteriores, presenta un incremento a los 7 días de curado. Por otro lado, se mantiene siempre inferior a la serie M1 pero con pendiente siempre positiva, desde el día 0 hasta el día 90. Si bien la resistencia al día 90 es menor que la alcanzada por M1, es superior en casi 100 kPa a la del suelo sin adición.

Por último, en M3 no se observa un incremento significativo de la resistencia a la compresión simple a medida que aumenta el tiempo de curado. En esta mezcla, la resistencia a la compresión simple ( $q_u$ ) es en todo momento bastante menor que la del suelo. A la edad de 28 días se obtuvo una resistencia a la compresión simple ( $q_{u\ 28d}=557$  kPa) inferior a la obtenida a las edades de 7 ( $q_{u\ 7d}=637$  kPa) y 90 días ( $q_{u\ 90d}=657$  kPa). La nula mejora en la serie M3 se debe a la carbonatación desarrollada en la cal al momento de realizar las mezclas.

El comportamiento de los módulos de deformación de las 4 series es ligeramente diferente al descrito para la resistencia a la compresión simple de las mismas. En las Figuras Figura 7 y Figura 8 se representa la variación en el tiempo del módulo secante medio de la deformación en rotura y el módulo secante medio de la deformación a 50% de la rotura respectivamente, y el error estándar asociado a cada uno.

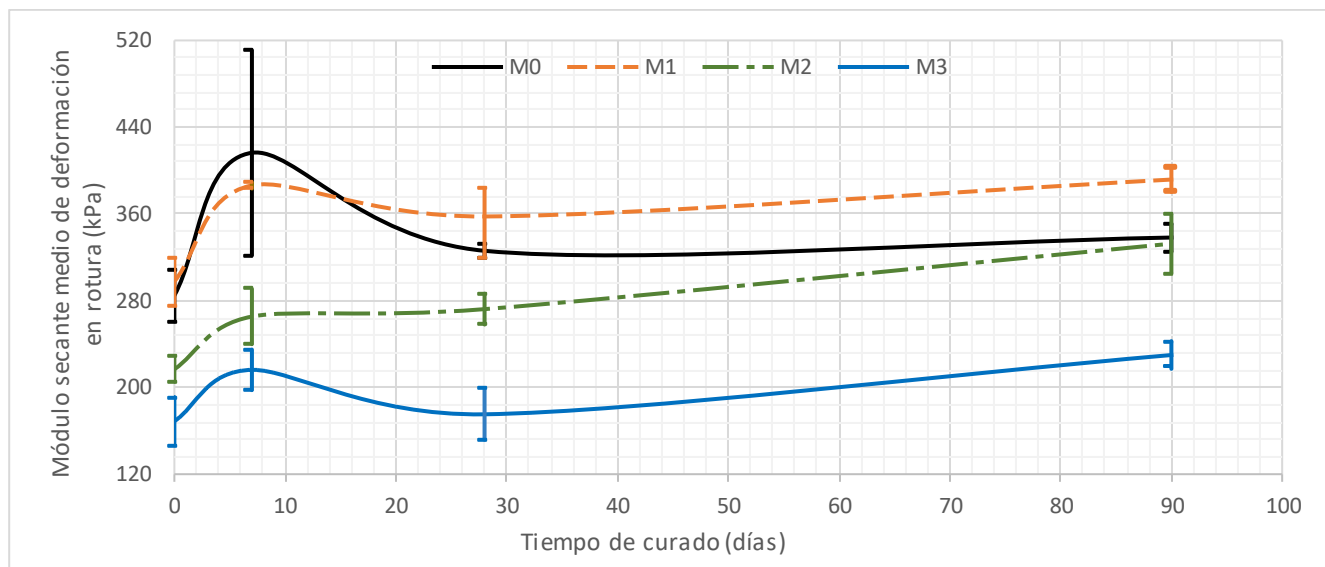


Figura 7: Variación de los módulos secantes medios de deformación en rotura (kPa) con respecto al tiempo de curado (días) de M0, M1, M2 y M3.

La muestra M0, al igual que lo descrito para la resistencia a la compresión simple, debiese tener un módulo de deformación, tanto en rotura como a 50% de la rotura, constante e igual para todas las edades. Por lo que el comportamiento que ocurre entre 28 y 90 días de curado para M0 en las figuras 7 y 8 correspondería a los módulos de deformación del suelo.

El módulo secante medio de deformación en rotura para la serie M1 muestra un incremento entre los 0 y 7 días de curado desde 298 a 386 kPa con una leve disminución a los 28 días, pero que luego aumenta suavemente hasta llegar a 392 kPa el día 90, con un módulo de deformación en rotura superior al del suelo que corresponde a 338 kPa a esa misma edad.

La mezcla M2 muestra un incremento en su módulo de deformación en rotura entre los 0 y 7 días de 217 a 265 kPa, pero este comienza a aumentar de manera suave hasta alcanzar una deformación en rotura de 333 kPa a los 90 días de curado, edad en la que recién alcanza el módulo de deformación en rotura exhibida por la serie M0.

Por su parte la serie M3 tiene el mismo comportamiento exhibido para la resistencia a la compresión simple por la carbonatación de la cal.

Por otro lado, el módulo secante medio de deformación a 50 % de la rotura con respecto al tiempo de curado que se presentan en la Figura 8 muestra que la serie M1 se comporta similar a M0, con una pequeña variación a los 90 días.

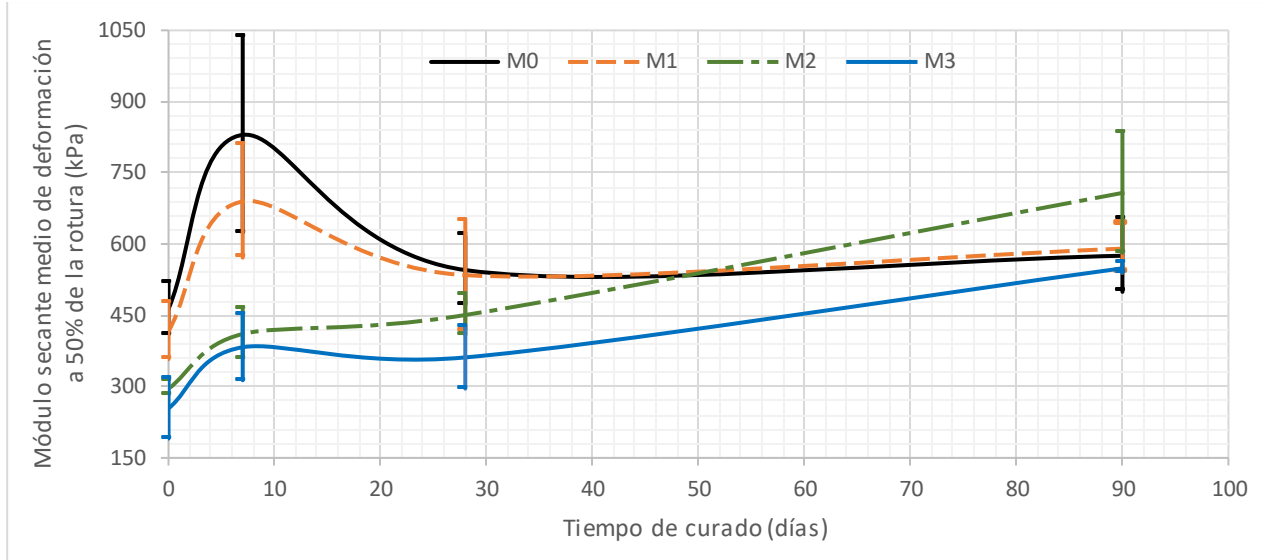


Figura 8: Gráfica de los módulos secantes medios de deformación a 50% de la rotura (kPa) v/s tiempo de curado (días) y el error asociado de M0, M1, M2 y M3.

Por su parte, la serie M2 mantiene una evolución positiva en el módulo de deformación desde el día 0 y es la única que presenta un módulo secante medio a 50% de la rotura mayor al del suelo a la edad de 90 días, el que corresponde a 708 kPa frente a los 576 kPa del suelo y 590 kPa de M1 a la misma edad.

La serie M3, a diferencia de lo observado en las Figuras Figura 6 y Figura 7, en las que la mejora en la resistencia era prácticamente nula, experimenta un aumento en el módulo secante a 50% de la rotura, llegando a la edad de curado de 90 días con un valor de 549 kPa, 27 kPa por debajo de M0.

Finalmente, debido al estado de la cal en la muestra patrón no fue posible comparar la evolución de las muestras con escoria con la muestra con cal y solo se pueden contrastar con la muestra de suelo solo.

### 3.2 Ensayo de Corte Directo.

La mejora de los parámetros resistentes a largo plazo de las mezclas se determinó mediante el ensayo de corte directo, siguiendo el procedimiento indicado en el apartado 2.2.3.

Al inicio del ensayo, las probetas se compactaron con el agua necesaria para alcanzar la humedad óptima de la mezcla ensayada, sin determinar la humedad de fabricación real de la probeta antes de saturar, considerando que esta no debería afectar en los valores obtenidos al estar 100% saturada. Con el avance en los ensayos, y por la necesidad de repetir algunos puntos de una misma serie, se consiguieron esfuerzos de corte máximos muy diferentes para igual tensión normal. Entonces, en las probetas siguientes se determinó la humedad de compactación antes de saturar la muestra y se llegó a la suposición de que la humedad de fabricación afecta en los

pick alcanzados por la muestra, aumentando o disminuyendo los esfuerzos de corte máximos conforme la probeta se encontraba más seca o húmeda.

Dada la situación antes descrita, se cree que los datos presentados a continuación están estrechamente condicionados por la humedad de fabricación, sobre todo aquellos que dependen de las condiciones de compactación, como son el esfuerzo de corte máximo y la dilatancia.

En la Figura 9a se muestra la variación del esfuerzo de corte con respecto al desplazamiento horizontal de la mezcla M1. En la citada figura se observa claramente que todas las probetas presentan máximo y luego decaen llegando a un punto en que ese valor se mantiene constante conocido como estado crítico. Todas las series ensayadas describen el mismo comportamiento descrito anteriormente.

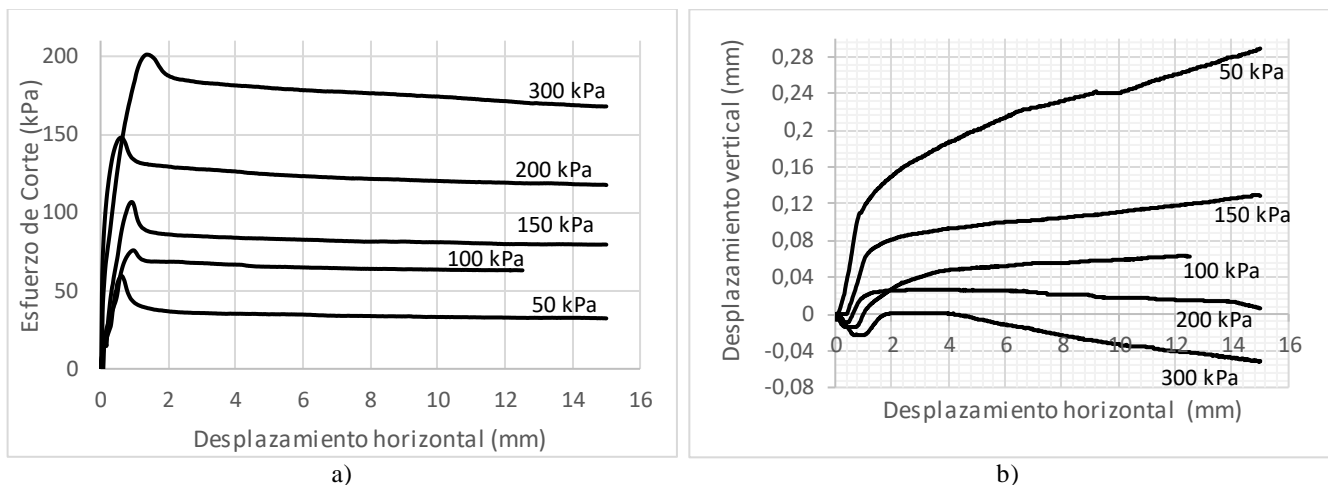


Figura 9: Resultados del ensayo de corte directo de M1. a) Variación de esfuerzo de corte (kPa) con respecto al desplazamiento horizontal (mm). b) Variación del desplazamiento vertical (mm) con respecto al horizontal (mm).

Los valores máximos obtenidos están estrechamente relacionados con las condiciones de compactación de la muestra ensayada y, en concreto, se cree que con la humedad de compactación. Por otro lado, el estado crítico teóricamente no depende de las condiciones de compactación, pues una vez que el material alcanza ese estado tiene una pérdida parcial de la memoria. Pero como en esta investigación también se obtuvieron variaciones en los resultados en estado crítico, no se tiene la certeza de si hay o no influencia de las condiciones de compactación sobre este estado.

El resumen de esfuerzos de corte para cada tensión normal empleada en cada una de las mezclas se muestra en la Tabla 12, donde se ve un aumento en el esfuerzo de corte máximo y crítico del suelo al agregar escoria (M1 y M2), pero M3 alcanza esfuerzos de corte prácticamente iguales a los del suelo.

La Figura 9b representa las variación del desplazamiento vertical respecto al desplazamiento horizontal de la muestra M1, de estas curvas se obtiene el ángulo de dilatancia. Este comportamiento al igual que los esfuerzos máximos, está relacionado con las condiciones de compactación de la probeta. El análisis de la dilatancia se entregará más adelante, por ahora nos centraremos en los parámetros resistentes de las diferentes muestras.

Tabla 12: Resumen de tensiones de corte máximas y críticas del ensayo de corte directo de todas las mezclas a diferentes tensiones normales

$\sigma_n$ (kPa)	M0		M1		M2		M3	
	$\tau_{m\acute{a}ximo}$ (kPa)	$\tau_{cr\acute{it}ico}$ (kPa)	$\tau_{m\acute{a}ximo}$ (kPa)	$\tau_{cr\acute{it}ico}$ (kPa)	$\tau_{m\acute{a}ximo}$ (kPa)	$\tau_{cr\acute{it}ico}$ (kPa)	$\tau_{m\acute{a}ximo}$ (kPa)	$\tau_{cr\acute{it}ico}$ (kPa)
<b>50</b>	38	30	59	32	53	34	54	33
<b>100</b>	71	47	76	63	100	75	72	44
<b>150</b>	91	69	107	79	145	92	113	90
<b>200</b>	100	91	148	118	194	135	123	116
<b>300</b>	156	133	201	168	205	148	164	153

Al dibujar una gráfica  $\tau$ - $\sigma$ , tanto de los esfuerzos de corte máximos como de los críticos, se obtiene la envolvente de falla o línea de resistencia intrínseca definida Mohr que puede ajustarse a una recta cuya pendiente corresponde al ángulo de rozamiento y la intersección de esta con el eje de ordenadas a la cohesión. En el estado crítico la cohesión es cero.

La muestra correspondiente al suelo tiene un ángulo de rozamiento interno máximo de  $24^\circ$  y una cohesión de 20 kPa, en estado crítico el ángulo de rozamiento es de  $20^\circ$ . Para las mezclas con escoria el ángulo de rozamiento interno máximo aumenta de acuerdo al porcentaje de escoria, siendo  $31^\circ$  para M1 y  $32^\circ$  en M2. Si bien la cohesión también aumenta, la máxima mejora respecto al suelo sin ninguna adición (M0) se presenta en la mezcla M2.

En estado crítico la situación cambia, ya que aquí es M1 la mezcla con mayor ángulo de rozamiento interno con  $\phi_{cr\acute{it}ico} = 29^\circ$ , mientras que M2 experimenta un aumento muy inferior respecto a M0.

La mezcla M3 en estado máximo mantiene el  $\phi_{m\acute{a}ximo}$  del suelo ( $24^\circ$ ) pero aumenta la cohesión en 14 kPa con respecto a la de M0. En estado crítico se observa un aumento del  $\phi_{cr\acute{it}ico}$  de  $4^\circ$  con respecto al del suelo. Todo lo anteriormente descrito se resume en la Tabla 13.

La muestra patrón M3 para los ensayos de corte directo presenta el mismo problema de la muestra de compresión simple, es por eso que las mejoras en la resistencia que se observan en M3 son leves y hace prácticamente imposible comparar los resultados con los obtenidos en las mezclas M1 y M2.

Tabla 13: Resumen resultados de parámetros resistentes de ensayo de corte directo de todas las mezclas y el indicador de la bondad del ajuste obtenido.

Mezclas	Máximo			Crítico	
	$\phi_{m\acute{a}ximo}$ ( $^\circ$ )	c (kPa)	R <sup>2</sup>	$\phi_{cr\acute{it}ico}$ ( $^\circ$ )	R <sup>2</sup>
<b>M0</b>	24	20	0.978	23	0.998
<b>M1</b>	31	23	0.989	29	0.992
<b>M2</b>	32	39	0.899	25	0.912
<b>M3</b>	24	34	0.972	27	0.967

En la Figura 9b, anteriormente descrita, se muestran las curvas que describen el comportamiento del suelo al aplicar un esfuerzo cortante, este comportamiento puede ser dilatante, es decir, aumenta su volumen a medida que se aplica el esfuerzo de corte, o contractivo, en este caso reduce su volumen a medida que se aplica el esfuerzo.

El ángulo de dilatancia ( $\psi$ ) en los suelos granulares depende si el suelo está en estado denso o suelo y en las arcillas este parámetro está relacionado con la razón de sobreconsolidación del mismo, que tiene que ver con el historial de tensiones que tiene ese suelo.

En la Tabla 14 se muestra el ángulo de dilatancia de las mezclas donde vemos que el suelo es dilatante para tensiones normales inferiores a 150 kPa. Sin embargo, en las mezclas con escoria, el comportamiento de la muestra es dilatante aún para tensiones normales de 300 kPa.

Tabla 14: Dilatancia de las mezclas M0, M1, M2 y M3.

Tensión normal $\sigma_n$ (kPa)	Ángulo de dilatancia ( $\psi$ ) (°)			
	M0	M1	M2	M3
50	3	8	7	5
100	4	3	6	4
150	3	4	6	-2
200	-2	3	5	-2
300	0	2	3	-5

#### 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se presentan las principales conclusiones de este trabajo, colocando especial énfasis en resultados obtenidos, así como recomendaciones metodológicas y de futuras líneas investigación.

- El ensayo realizado para determinar el porcentaje de portlandita y calcita arrojó como resultado final que la cal estaba carbonatada, porque el material tenía alto contenido de calcita (54%) y un porcentaje de dióxido de carbono (24%) superior al que fija la norma NCh 1928 (8%) para cales hidráulicas. Por lo tanto, no se pudo cumplir el objetivo de comparar las eventuales mejoras del suelo al adicionar escoria respecto a la adición de cal.
- El principal inconveniente del ensayo de CNC fue conseguir probetas que cumplieran con el criterio de aceptación de humedad al momento de rotura, por lo que hubo que hacer muchas repeticiones con la finalidad de conseguir resultados que evidenciaran una eventual mejora por adicionar escoria y no por tener una humedad lejana al óptimo, ya que, como se ha comprobado en este trabajo, a menor humedad de la probeta mayor es la resistencia a la compresión simple.
- En esta investigación también se demostró la influencia de la humedad en el aumento o disminución de la resistencia a la compresión simple descrita por Barros et al., (2018), donde para una variación de 0,5% bajo la humedad óptima se obtuvo un incremento significativo de la resistencia a compresión simple. Independiente del tiempo de curado y de la mezcla, el fenómeno es el mismo.
- Los resultados obtenidos de ensayos de compresión simple muestran que los parámetros resistentes a corto plazo tienen una moderada mejora, siendo la mezcla de suelo con un 5% de escoria (M1) la que tuvo un mayor incremento de su resistencia a medida que aumentó el tiempo de curado, alcanzando 947 kPa a los 90 días. Sin embargo, en los parámetros deformacionales fue la mezcla con un 10% de escoria (M2) la que consiguió mayores mejoras, ya que su módulo secante de deformación medio tiene un incremento positivo desde el día 0 y se mantiene en el tiempo.
- En los ensayos de corte directo se puede concluir que agregar porcentajes de escoria blanca al suelo mejora sus parámetros resistentes a largo plazo. En este caso, la muestra M2 alcanza un ángulo de rozamiento interno máximo mayor que la muestra M1 con diferencia de 1°, pero en estado crítico el ángulo es mayor para M1 ( $\phi_{\text{crítico}} = 29^\circ$ ).

- Según lo obtenido de la dilatación podemos ver que el suelo sin escoria tiene un comportamiento contractivo para tensiones normales mayores a 150 kPa, sin embargo al adicionar escoria el comportamiento del suelo es dilatante incluso a tensiones normales de 300 kPa.
- Se recomienda realizar otros ensayos para obtener los parámetros resistentes y de deformación a corto plazo, debido a que los resultados en un ensayo de compresión simple en probetas remodeladas están condicionados por varios factores que pueden aumentar o disminuir la resistencia a la compresión simple, siendo la humedad de fabricación una de las principales. También se debe destacar que ser más o menos minucioso al momento de compactar una probeta afecta en los resultados, ya que si se realiza una mala escarificación o se olvida crear esa superficie de unión entre capas, se crea un plano de debilidad dentro de la probeta y al momento de realizar la compresión se producen roturas por dichos planos.
- En cuanto a los resultados del ensayo de corte directo, se recomienda realizar una línea investigativa que corrobore la influencia de la humedad de fabricación de las probetas sobre los esfuerzos tangenciales máximos y si tiene influencia también sobre los críticos. Aunque en esta investigación se cree que en las mezclas con escoria no se alcanzó el estado crítico, por lo que en estudios futuros se sugiere alcanzar desplazamientos mayores al 15 % alcanzado en esta investigación.
- Por lo tanto, de los resultados obtenidos en ambos ensayos se puede aseverar que, si bien se observan mejoras, los resultados no son concluyentes, pues en el caso de los ensayos de compresión simple existen muchas variables que condicionan los resultados, además, la mejora se podría atribuir a tiempos de curado superiores a 90 días, ya que es a esta edad donde se puede asumir que el aumento en la resistencia es debido al contenido de escoria, porque en las edades más tempranas la resistencia es prácticamente muy cercana a la del suelo solo. Por otro lado, en el ensayo de corte directo, se generaron nuevas interrogantes por resolver, antes de entregar una conclusión definitiva.
- Por último, por lo complejo que fue conseguir datos satisfactorios del ensayo de compresión simple se recomienda realizar ensayos triaxiales CD o CU en probetas con las edades de curado estudiadas aquí y/o a edades mayores 90 días para corroborar si existe una mejora real de las propiedades mecánicas del suelo al mezclarlo con escoria.

## 5 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- **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 3080** (2003). (Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions.
- **Barros, C., Montenegro, J. y Lapeña, P.** (2018). Variación de los parámetros resistentes de un suelo arcilloso a diferentes condiciones de humedad y pesos específicos de compactación. Simposio de Habilitación Profesional (Inédito). Departamento de Ingeniería Civil: 22 pp. Concepción.
- **Caballero, A.** (2017). Caracterización de la escoria blanca proveniente de la siderurgia integral. Informe de proyecto de título para otra al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción (Inédito): 74 PP. Concepción.
- **Claveau-Mallet, D., Boutet, E y Comeau, Y.** (2018). Steel slag filter design criteria for phosphorus removal from wastewater in decentralized applications. Elsevier. Water research 143: 28-37.
- **Faisal I., Ibrahim M. y Hisham Y.** (2017). Effect of by-product steel slag on the engineering properties of clay soils. Journal of King Saud University. Engineering Sciences 29, 394–399.
- **Geiseler, J.** (1996). Use of steelwork slag in Europe. Waste Management 1996, 16 (1-3), 59-63.fcc
- **Guo, J., Bao, Y. and Wang, M.** (2018). Steel slag in China: treatment, recycling, and management. Elsevier, waste management 78: 318-330.



- **IHOBE.** Libro blanco de las escorias IHOBE (1999). Sociedad Pública de Gestión Ambiental. Departamento de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente. Gobierno Vasco. Dep Legal BI-249-99.
- **Juckes, L.M.** (2003). The volume stability of modern steelmaking slags. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 112, 117-197.
- **Kanagawa, A. and Kuwayama, T.** (1997). The improvement of soft clayey soil utilizing reducing slag produced from electric arc furnace. *Denki Seiko*, 68 (4), 261-267.
- **Leiva D., Montenegro J. y Ponce R.** (2017). Caracterización en laboratorio de mezclas suelo-escoria blanca de acerería (LFS) para utilización en obras viales. Simposio de Habilitación Profesional (Inédito). Departamento de Ingeniería Civil: 22 pp. Concepción.
- **Maghool F., Arulrajah A., Horpibulsuk S. and Du Y.** (2017). Laboratory Evaluation of Ladle Furnace Slag in Unbound Pavement-Base/Subbase Applications. American Society of Civil Engineers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 9 p.
- **Manso J.M, Losáñez M., Polanco JA. and González J.J.** (2005). Ladle Furnace Slag in Construction, *Journal of materials in Civil Engineering* 17, 5: 513-518.
- **Manso J.M., Ortega-López V., Polanco J.A. and Setién J.** (2013). The use of ladle furnace slag in soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 40:126-34.
- **Montenegro, JM.** (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.
- **Montenegro, J.M., Celemín-Matachana, M., Cañizal, J. y Setién-Marquinez, J.** (2012), Ladle furnace slag in embankment construction: Expansive behavior, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25, 8, 972-979.
- **NCh 1928 of 93:** “Albañilería armada – Requisitos para el diseño y calculo”.
- **NCh 2256 of 2001:** “Morteros- parte 1: requisitos generales”.
- **Nippon Slag Association** (Página consultada el 15 de abril de 2019) Iron and steel slag products. [online]. Dirección URL: <http://www.slg.jp/e/slag/product/index.html>
- **Ortega-López V, Manso JM, Cuesta II, González JJ.** (2014). The long-term accelerated expansion of various ladle-furnace basic slags and their soil-stabilization applications. *Construction and Building Materials*, 68(15):455-64.
- **Quezada J.** (1996). Geología urbana y ambiental de la ciudad de Concepción. Memoria para optar al título de geólogo, facultad de ciencias químicas, Universidad de concepción. Concepción. Chile.
- **Rodríguez A., Gutiérrez-González S., Horgnies M. and Calderón V.** (2013). Design and properties of plaster mortars manufactured with ladle furnace slag. *Elsevier, Materials and Design* 52: 987–994.
- **Santamaría A., Rojí E., Skaf M., Marcos I. and Gonzalez J.** (2016). The use of steelmaking slags and fly ash in structural mortars. *Construction and Building Materials* 106 (2016) 364–373.
- **Setién J., Hernández D. and González J.J.** (2009). Characterization of ladle furnace basic slag for use as a construction material. *Construction and Building Materials*, 23(5): 1788-94.
- **Shi, C.** (2004). Steel slag- Its production, processing, characteristics and cementitious properties. *Journal of Civil Engineering* 16, 3, 230-236.
- **Tossavainen, M., Engstrom, F., Yang, Q., Menad, N., Lidstrom, M. and Bjorkman, B.** (2007). Characteristics of steel slag under different cooling conditions. *Elsiever, waste management* 27 (10): 1335-1344.
- **Wang, G., Wang, Y. and Gao, Z.** (2018). Use of steel slag as a granular material: Volume expansion prediction and usability criteria. *Elsevier, Journal of Hazardous materials* 184 (1-3): 555-560.

- **World Steel Association** (Página consultada en enero de 2019) Steel Statistical Yearbooks 2010 to 2018. [online]. Dirección URL: <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook.html>
- **Yildirim Z. and Prezzi M.** (2011). Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. *Advances in Civil Engineering*, 463638.
- **Yildirim Z. and Prezzi M.** (2017). Experimental evaluation of EAF ladle steel slag as a geo-fill material: Mineralogical, physical & mechanical properties. *Construction and Building Materials* 154: 23–33.
- **Zalar, V., Mladenovic A., Mirtic B., Meden A., Scancar J. and Milacic R.** (2015). Recycling of ladle slag in cement composites: Environmental impacts. *Waste Management* 43: 376–385.
- **Zaragoza R., Nassur A., Concepción A. y Tápanes D.** (2001). Utilización de las escorias de los hornos de arco eléctrico y de cuchara como materiales de construcción. *Ingeniería Mecánica*, 1: 19-26.
- **Zarate, N., Montenegro, J.M. y Lapeña, P.** (2018). Propiedades resistentes y expansivas de una mezcla de suelo arcilloso y escoria blanca (LFS) proveniente de una planta de siderurgia integral. Simposio de Habilitación Profesional (Inédito). Departamento de Ingeniería Civil: 18 pp. Concepción.