

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Tesis Doctoral



REUTILIZACIÓN DE RESIDUOS SIDERÚRGICOS PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS LOÉSICOS COMPACTADOS DEL CENTRO DE ARGENTINA

Autora: Mg. Ing. Mozejko, Clara Alexandra

Director: Dr. Francisca, Franco Matías

Agosto de 2022

**REUTILIZACIÓN DE RESIDUOS SIDERÚRGICOS PARA LA
ESTABILIZACIÓN DE SUELOS LOÉSSICOS COMPACTADOS
DEL CENTRO DE ARGENTINA**

Por

Mg. Clara Alexandra Mozejko

Director:

Dr. Franco Matías Francisca

Comisión Asesora

Dr. Ing. Daniel A. Glatstein. FCEFyN, UNC

Dr. Ing. Gonzalo M. Aiassa Martínez. FRC, UTN

Esta Tesis fue enviada a la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba como requisito parcial para la obtención del grado académico de Doctor en Ciencias de la Ingeniería.

Córdoba, Argentina

(Agosto de 2022)



ACTA DE EXAMEN

Libro: E2022 Acta: 00254 Hoja 01/01
LLAMADO: Llamado del Turno P10-(T209)_TESIS 14/11/2022
CATEDRA - MESA: 14-11-2022 MOZEJKO Clara

(P10-DI002) TESIS DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA

NÚMERO	APELLIDO Y NOMBRE	DOCUMENTO	INGR.	COND.	NOTA	FIRMA
36233630	MOZEJKO, CLARA ALEXANDRA	DNI 36233630	2018		A (Aprobado)	

ZEBALLOS, MARCELO ESTEBAN - LOCATI, FRANCISCO - LOPEZ LARA, TERESA - BOTERO JARAMILLO, EDUARDO -
Observaciones:

Córdoba, ___/___/____-.

Certifico que la/s firma/s que ha/n sido puesta/s en la presente Acta pertenece/n a: _____

1	0	1	0	1
Inscriptos	Ausentes	Examinados	Reprobados (0-3)	Aprobados (4-10)

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia Bo, Klara, Ba, Juan y Claudio, quienes me apoyaron durante la realización del doctorado. Gracias por acompañarme en esta y todas las etapas de mi vida.

Agradezco a Franco Francisca, mi Director de Tesis. Gracias por la confianza depositada en mí, por los consejos brindados, por acompañarme siempre, por el tiempo y dedicación que contribuyen cada día a mi formación tanto profesional como personal. Gracias.

Agradezco a mi grupo de investigación, especialmente a Magalí, Marcos y Daniel, por sus consejos y su amistad. Gracias por brindarme ayuda cada vez que la necesité durante todos estos años.

Quisiera agradecer a mis compañeros de oficina Ignacio y Julieta, amigos con los que compartí muchas horas de trabajo resultando una compañía fundamental en este proceso. A mis compañeros de laboratorio, Guillermo y Agustín, gracias por la ayuda y compañía durante este tiempo. A todos, gracias por compartir conmigo el camino del Doctorado.

Agradezco a todos los docentes del área de Geotecnia, por todos los conocimientos transmitidos que me ayudaron en mi formación académica. De igual manera quisiera agradecer a mi comisión asesora, Daniel Glatstein y Gonzalo Aiassa, por la dedicación y compromiso, por los consejos brindados, y por las preguntas planteadas que permitieron enriquecer el trabajo. Agradezco a mi comisión evaluadora, por sus comentarios y sugerencias.

Finalmente, agradecer al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por la financiación de mis estudios de posgrado. Agradezco a la universidad Nacional de Córdoba, por permitirme acceder a la educación pública que me permite cerrar la etapa del doctorado. Expreso mi gratitud por el financiamiento brindado para las investigaciones a CONICET, SeCyT-UNC, FonCyT y MinCyT-Cba.

REUTILIZACIÓN DE RESIDUOS SIDERÚRGICOS PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS LOÉSSICOS COMPACTADOS DEL CENTRO DE ARGENTINA

RESUMEN

La escoria siderúrgica es un subproducto o residuo generado por la industria del acero. En la actualidad es de vital importancia reducir la disposición final de residuos y encontrarles nuevos usos y aplicaciones con un modelo de producción de economía circular. En este trabajo se investigan mezclas compactadas de suelo-escoria para evaluar el uso potencial de los residuos de acería como agente estabilizante. Para ello se evaluaron los principales procesos responsables de cambios que ocurren en un suelo con escoria tanto a nivel microscópico como macroscópico. Se propuso un análisis novedoso de identificación de productos de reacción a partir de imágenes de microscopía de barrido electrónico, confocal y microscopio petrográfico. De esta manera se pudo identificar y cuantificar las reacciones puzolánicas que se desarrollan en mezclas de limo loésico con escorias. Se generaron datos inéditos sobre los cambios que sufre este suelo en relación al comportamiento mecánico e hidráulico. Los resultados obtenidos permitieron cuantificar los incrementos de resistencia y rigidez esperados con el envejecimiento o curado de las mezclas, el contenido óptimo de escorias, y determinar por primera vez que los hidrogeles permiten reducir la conductividad hidráulica de los limos estabilizados. Se demostró que este efecto se encuentra relacionado con la colmatación física que ocurre por la formación de hidrogeles y cementación de las partículas. Los aportes de la tesis abren nuevas oportunidades para el aprovechamiento de las escorias siderúrgicas para la estabilización de suelos y su utilización en construcciones civiles y geoambientales.

REUSE OF STEEL SLAG FOR THE STABILIZATION OF COMPACTED LOESS SOILS FROM THE CENTER OF ARGENTINA

ABSTRACT

Steel slag is a steel industry-generated by-product. Finding new uses and applications of by products has significant importance due to the present need of minimizing the consumption of natural resources, reducing the amount of waste disposal materials while finding novel sustainable applications for these materials. In this work, compacted soil-slag mixtures are investigated in order to evaluate steel slag potential use as a stabilizing agent. The main processes responsible for microscopic and macroscopic changes of stabilized soil were evaluated. A novel reaction product identification method is presented based on scanning electron, confocal and petrographic microscope images. In this way, identification and quantification of pozzolanic reactions developed in loessical silt slag mixtures was possible. Due to the investigation carried out on mechanical and hydraulic behavior, unprecedented data was generated. Obtained results allow quantifying expected strength and stiffness increase with mixtures aging, discretizing the optimal slag content, and determining for the very first time that hydrogel formation on stabilized soil promotes hydraulic conductivity reduction. It was shown that this reduction effect is related to the physical clogging due to hydrogel formation and particle cementation process. The contributions of this Thesis open new opportunities for steel slag reutilization as loessical silt stabilizing agent and its use in civil and geo-environmental construction.

RIUTILIZZO DELLE SCORIE D'ACCIAIO NELLA STABILIZZAZIONE DI LOESS COMPATTATO DAL CENTRO DI ARGENTINA

ABSTRACT

Le scorie di acciaio sono un sottoprodotto oppure un residuo generato dall'industria siderurgica. Allo stato attuale, è di vitale importanza ridurre lo smaltimento finale dei rifiuti e trovarne nuovi usi ed applicazioni sotto un modello produttivo di economia circolare. In questa Tesi, vengono studiate miscele compattate di loess-scoria per valutare il potenziale utilizzo dei rifiuti di acciaieria come agente stabilizzante. Per questo sono stati valutati, sia a livello microscopico che macroscopico, i principali processi responsabili dei cambiamenti che accadono in un terreno con scorie. È stata proposta una nuova analisi per la identificazione dei prodotti di reazione da immagini di microscopia elettronica a scansione confocale e petrografica. In questo modo è stato possibile identificare e quantificare le reazioni pozzolaniche che si sviluppano nelle miscele di limo loessico con scorie. Sono stati generati dati inediti sulle modifiche che questo terreno subisce in relazione al comportamento meccanico ed idraulico. I risultati ottenuti hanno consentito di quantificare gli incrementi di resistenza e rigidità attesi con l'invecchiamento o la stagionatura degli impasti, il contenuto ottimale di scorie, e di determinare per la prima volta che gli idrogel consentono di ridurre la conducibilità idraulica del limo stabilizzato, aprendo nuove possibilità di potenziali applicazioni dei terreni loessici come materiale da costruzione. È stato dimostrato che questo effetto è correlato all'intasamento fisico che si verifica a causa della formazione di idrogel e della cementazione delle particelle. I contributi della tesi aprono nuove opportunità per l'utilizzo delle scorie di acciaio per la stabilizzazione del suolo e il loro impiego nelle costruzioni civili e geoambientali.

Contenido

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Motivación y planteo del problema	1
1.2	Objetivos del trabajo	3
1.3	Organización del trabajo	4
2	ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO	8
2.1	Introducción	8
2.2	Reacciones puzolánicas	9
2.2.1	Clasificación de las puzolanas	10
2.2.2	Actividad puzolánica	13
2.3	Estabilización de suelos de grano fino	16
2.3.1	Estabilización mecánica	17
2.3.2	Estabilización química	18
2.3.3	Estabilización mediante la adición de residuos	26
2.4	Escorias siderúrgicas	29
2.4.1	Clasificación de los residuos siderúrgicos	30
2.4.2	Características y aplicaciones de las escorias	32
2.4.3	Usos y aplicaciones de las escorias como estabilizantes	35
2.5	Limos loésicos	38
2.5.1	Origen y génesis	38
2.5.2	Estrato geológico natural de loess en Argentina	39
2.5.3	Estabilización de limo loésico	42
2.5.4	Loess como material de construcción de barreras	45
2.6	Síntesis de los aspectos mas relevantes	47
3	MATERIALES Y MÉTODOS	50

3.1	Introducción	50
3.2	Caracterización de los suelos y materiales granulares utilizados	50
3.2.1	Ensayos de caracterización física	52
3.2.2	Caracterización mineralógica	53
3.2.3	Caracterización química	60
3.3	Caracterización de los fluidos ensayados	63
3.3.1	Agua destilada	63
3.3.2	Lixiviado natural	64
3.4	Procedimientos experimentales	66
3.4.1	Preparación de muestras compactadas	66
3.4.2	Determinación de propiedades químicas, ópticas y mineralógicas	68
3.4.3	Determinación de propiedades mecánicas	75
3.4.4	Determinación de propiedades hidráulicas	83
4	REACCIÓN PUZOLÁNICA EN MEZCLAS LIMO- ESCORIA	87
4.1	Introducción	87
4.2	Mecanismo de reacción	87
4.2.1	Alcalinidad en el medio	88
4.2.2	Presencia de sílice amorfa	90
4.3	Evaluación de la puzolanidad	92
4.4	Efectos microscópicos de las reacciones puzolánicas	96
4.4.1	Espacios vacíos afectados por reacciones puzolánicas	97
4.5	Borde de reacción	99
4.6	Mapas composicionales	103
4.7	Cambios granulométricos producidos por reacciones puzolánicas	105
4.8	Principales aportes del capítulo	107

5	COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LIMO CON ESCORIAS SIDERÚRGICAS	111
5.1	Introducción	111
5.2	Influencia en la curva de compactación del limo loésico	112
5.3	Comportamiento tenso-deformacional en compresión simple de muestras estabilizadas	113
5.3.1	Influencia del contenido de escoria	114
5.3.2	Influencia del tiempo de curado sobre la RCS	117
5.3.3	Influencia del contenido de humedad de amasado	122
5.4	Comportamiento tenso-deformacional en compresión confinada de muestras estabilizadas	127
5.5	principales aportes del capítulo	132
6	COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LIMO LOÉSICO COMPACTADO Y ESTABILIZADO	136
6.1	Introducción	136
6.2	Influencia del desarrollo de hidrogeles	136
6.3	Influencia del desarrollo de hidrogeles en el comportamiento mecánico-hidráulico acoplado	138
6.3.1	Discusión de resultados: Aplicación de la ecuación de Kozeny – Carman para analizar cambios en la conductividad hidráulica	141
6.4	Principales aportes del capítulo	149
7	COMPORTAMIENTO MECÁNICO-HIDRÁULICO DE MEZCLAS LIMO-BENTONITA ESTABILIZADAS	152
7.1	Introducción	152
7.2	Interacción limo-escoria-bentonita	153
7.2.1	Expansión libre en mezcla total	154
7.2.2	Expansión libre en mezcla lavada	154

7.3	Comportamiento tenso-deformacional de muestras limo-bentonita estabilizadas	156
7.3.1	Influencia del tiempo de curado en muestras con bentonita sobre la RCS	157
7.3.2	Influencia de la adición de SS en la compresibilidad de las muestras estabilizadas	160
7.4	Comportamiento hidráulico de muestras limo-bentonita estabilizadas con escorias	164
7.4.1	Influencia del estado tensional y envejecimiento	164
7.4.2	Influencia de la relación de vacíos inicial	167
7.5	Análisis comparativo con limos de diversa procedencia	171
7.6	Implicancias y limitaciones de conocimientos generados	174
7.7	Principales aportes del capítulo	176
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES	180
8.1	Conclusiones	180
8.2	Recomendaciones para futuros estudios	187
	ANEXO I	189
	ANEXO II	199
	ANEXO III	200
	Producción Científica y Tecnológica asociada a la Tesis	200
	BIBLIOGRAFÍA	201

Listado de Figuras

<i>Figura 1-1 Esquema de la metodología de trabajo.</i>	7
<i>Figura 2-1 Clasificación de puzolanas [adaptado de Massazza, 1993; Snelings et al., 2012].</i>	11
<i>Figura 2-2 Composición química de los materiales suplementarios [adaptado de: Deloye, 1993; Quintana Crespo, 2005; Lotenbach et al., 2011; Black et al., 2016].</i>	12
<i>Figura 2-3 Solubilidad de los compuestos de sílice amorfa en función de la temperatura y pH del medio – [extraído y adaptado de Chan, 1989].</i>	15
<i>Figura 2-4 Energía y CO₂ incorporada para materiales típicamente utilizados en la industria de la construcción [extraído de Hammond et al., 2011].</i>	24
<i>Figura 2-5 Escoria de acería, producida en función del proceso de fabricación del acero [adaptado de Chadwick 1988; Grubeša et al., 2016; Gencel et al., 2021].</i>	30
<i>Figura 2-6 Distribución mundial de sedimentos eólicos [extraído de Li et al., 2020].</i>	40
<i>Figura 2-7 Distribución de suelo loésico en Argentina [extraído de Zárate, 2007].</i>	41
<i>Figura 3-1 Curvas granulométricas de los materiales: limo loésico, escoria siderúrgica y bentonita.</i>	53
<i>Figura 3-2 Difractograma obtenido por DRX en muestras de limo- roca total (a) y escoria - roca total (b).</i>	54
<i>Figura 3-3 Patrones de difracción de rayos X de la muestra de Bentonita CATAE. Qz: cuarzo, Fd: feldespatos, C: calcita, Y: yeso, Ceo: Ceolita, Sm: Esmectita [Musso, 2011].</i>	56
<i>Figura 3-4 Muestra de loess suelto.</i>	57
<i>Figura 3-5 Fotomicrografías (a y c, nicoles paralelos; b y d, nicoles cruzados). a) vista general del loess suelto. b) mismo sector a NX. c) detalle de loess suelto d) mismo sector a NX. Qz: cuarzo, Fs: fragmento sedimentario, Fm: fragmento metamórfico, Hbl: hornblenda, Bt: biotita.</i>	58
<i>Figura 3-6 Fotomicrografías (a y c, nicoles paralelos; b y d, nicoles cruzados). a) detalle de loess, identificación hornblenda. b) mismo sector a NX. c) detalle de loess, identificación de plagioclasa. d) mismo sector a NX. Hbl: hornblenda, Pl: plagioclasa, Bt: biotita, Zrn: circón, Ser: sericita.</i>	58
<i>Figura 3-7 Fotomicrografías (a y c, nicoles paralelos; b y d, nicoles cruzados). a) detalle de loess, identificación cuarzo. b) mismo sector a NX. c) detalle de loess, identificación de mineral opaco. d) mismo sector a NX. Qz: cuarzo, Ap: apatita, Opq: Mineral opaco.</i>	59
<i>Figura 3-8 Fotomicrografías (a y c, nicoles paralelos; b y d, nicoles cruzados). a) detalle de loess, identificación biotita. b) mismo sector a NX. c) detalle de loess, identificación de muscovita. d) mismo sector a NX. Bt: Biotita; Ms: muscovita.</i>	59
<i>Figura 3-9 Fotomicrografías (a, nicoles paralelos; b, nicoles cruzados). a) detalle de loess, identificación triza de vidrio volcánico. b) mismo sector a NX. Vv: vidrio volcánico.</i>	60
<i>Figura 3-10 Imagen de electrones secundarios tomada por SEM en muestra de limo loésico.</i>	60
<i>Figura 3-11 Composición química semicuantitativa elemental del limo, analizado por EDX.</i>	61
<i>Figura 3-12 Imagen de electrones secundarios tomada por SEM. Textura superficial de la escoria siderúrgica.</i>	61

<i>Figura 3-13 Composición química semicuantitativa elemental de las escorias siderúrgicas, analizadas por EDX.</i>	62
<i>Figura 3-14 Ensayo de conductividad eléctrica propuesto por Luxan et al., (1988), junto con los sensores utilizados.</i>	70
<i>Figura 3-15 Equipo SEM utilizado.</i>	71
<i>Figura 3-16 Microscopio confocal - LAMARX.</i>	72
<i>Figura 3-17 Imagen ilustrativa de la confección de cortes delgados.</i>	73
<i>Figura 3-18 Cortes delgados pertenecientes a las probetas analizadas.</i>	74
<i>Figura 3-19 Microscopio Leica DM 4500 P LED - CICTERRA.</i>	74
<i>Figura 3-20 Microscopio Leica DM EP - CICTERRA.</i>	75
<i>Figura 3-21 Molde tripartido de acero inoxidable y pisón de compactación.</i>	76
<i>Figura 3-22 Durham Geo-Slope Indicator modelo S-600 – laboratorio de Geotecnia FCEFyN.</i>	77
<i>Figura 3-23 Esquema consolidómetro – permeámetro.</i>	80
<i>Figura 3-24 Celda de consolidación combinada con permeámetro, laboratorio de Geotecnia FCEFyN.</i>	81
<i>Figura 3-25 Curva de calibración succión- contenido de agua para el metodo papel de filtro [extraído de normativa ASTM D5298].</i>	82
<i>Figura 3-26 Celdas de permeado de pared rígida.</i>	84
<i>Figura 4-1 Influencia en el pH de una solución acuosa con adición de escorias.</i>	89
<i>Figura 4-2 Fotomicrografías. Trizas volcánicas (elipses rojas) en muestras de limo compactado [L], identificadas en cortes delgados con nicoles paralelos (a) y nicoles cruzados (b).</i>	90
<i>Figura 4-3 Identificación de partículas ricas en silicio en muestras de limo compactado [L]. a) Imagen de electrones secundarios. b) Mapa composicional de silicio.</i>	91
<i>Figura 4-4 Variación de la conductividad eléctrica en función del tiempo de ensayo aplicando el método propuesto por Luxan y colaboradores [Luxan et al., 1989] para limo y escoria.</i>	93
<i>Figura 4-5 Influencia del tiempo de curado en las muestras de limo - escoria en la conductividad eléctrica.</i>	94
<i>Figura 4-6 Representación modelo de mezcla 80% limo + 20% escoria.</i>	96
<i>Figura 4-7 Imagen 3D obtenida del tamaño de poros, en muestras L-12% SS, con 0 días de curado (a) y con 56 días de curado (b). Dimensiones del tamaño o profundidad de poros vinculada al eje “z”.</i>	98
<i>Figura 4-8 Imágenes de electrones secundarios obtenidas por SEM en muestras metalizadas con oro (Au) a) L-20% SS con 0 días de curado. b) L-20% SS luego de 56 días de almacenamiento.</i>	99
<i>Figura 4-9 Fotomicrografías. Muestra L-12% SS a 0 días; a) Imagen a nicoles paralelos. b) Imagen con nicoles cruzados. Las elipses rojas indican la presencia de una triza de vidrio volcánico.</i>	100
<i>Figura 4-10 Fotomicrografías. a) Partícula de escoria en la muestra L-12% SS, con 0 días de almacenamiento a nicoles cruzados. b-c) Detalle de contacto neto entre la partícula de SS y limo a nicoles paralelos. d) Detalle de contacto entre partícula de SS y limo a nicoles cruzados.</i>	101

<i>Figura 4-11 Fotomicrografías. a) Partícula de escoria en la muestra L-12% SS, con 56 días de almacenamiento a nicoles paralelos. b-c) Detalle de contacto neto entre la partícula de SS y limo a nicoles paralelos. d) Detalle de contacto entre partícula de SS y limo a nicoles cruzados.</i>	102
<i>Figura 4-12 SEM-EDS. a y b) Partículas de escoria (gris claro) en L-12% SS a 0 días de almacenamiento (imágenes de electrones secundarios. c y d) Mapas composicionales de Si correspondientes a las imágenes “a” y “b”.</i>	104
<i>Figura 4-13 SEM-EDS. a y b) Partículas de escoria (gris claro) en L-12% SS a 56 días de almacenamiento (imágenes de electrones secundarios. c y d) Mapas composicionales de Si correspondientes a las imágenes “a” y “b”. Las líneas rojas indican los bordes de reacción en la escoria.</i>	104
<i>Figura 4-14 Cambios granulométricos observados en muestras L- 12% SS a partir del aumento del periodo de curado.</i>	106
<i>Figura 4-15 Manifestación de cambios granulométricos en los diámetros nominales de las muestras L-12% SS.</i>	107
<i>Figura 5-1 Influencia del contenido de escoria en la compactación de limo loésico.</i>	112
<i>Figura 5-2 Influencia de la adición de SS sobre el comportamiento mecánico de muestras compactadas a 0 días (a) y 7 días (b) de almacenamiento.</i>	115
<i>Figura 5-3 Influencia del contenido de escorias en la RCS de mezclas de limo compactado. la línea azul indica la diferencia entre las probetas sin adiciones del resto de las muestras. La línea roja indica la máxima RCS alcanzada por las muestras a 0 días de almacenamiento. La línea amarilla indica el incremento aproximado de resistencia al cabo de 7 días.</i>	116
<i>Figura 5-4 Influencia del periodo de almacenamiento en muestras de limo compactado.</i>	118
<i>Figura 5-5 Desarrollo de reacciones puzolánicas medido a partir de ensayos en resistencia a la compresión simple- RCS – en muestras a 0, 7, 28 y 56 días de almacenamiento L-24% SS.</i>	119
<i>Figura 5-6 Comportamiento mecánico de muestras L-12% SS con diferentes contenidos de humedad (w); a) 7 días de curado, b) 28 días de curado.</i>	124
<i>Figura 5-7 Variaciones en peso y humedad de muestras L-12% SS analizadas.</i>	126
<i>Figura 5-8 Influencia del tiempo de curado en la compresibilidad de muestras L-12% SS, permeados con agua destilada (a) y lixiviado natural (b).</i>	128
<i>Figura 5-9 Influencia del tiempo de curado en la deformación de muestras L-12% SS, permeados con agua destilada (a) y lixiviado natural (b).</i>	131
<i>Figura 6-1 Conductividad hidráulica en función del tiempo en probetas L-12% SS a 0 y 56 días de curado utilizando agua destilada y lixiviado natural.</i>	138
<i>Figura 6-2 Influencia del tiempo de curado y presión actuante en el comportamiento hidráulico de muestras estabilizadas L-12% SS permeadas con agua destilada (a) y lixiviado natural (b).</i>	140
<i>Figura 6-3 Función de relación de vacíos de Kozeny-Carman y relación de conductividad hidráulica para limo compactado con 12% SS con 0, 7, 28, 56 y 365 días de envejecimiento impregnado con agua destilada (a) y lixiviado natural (b).</i>	144

<i>Figura 6-4 Factor de forma Cs de acuerdo al modelo Kozeny-Carman para las mezclas L-12% SS con envejecimiento de 0 a 365 días.</i>	146
<i>Figura 6-5 Espacios ocupados por hidrogeles según el cálculo adaptado de Kozeny-Carman.</i>	148
<i>Figura 7-1 Fenómeno de expansión libre en material particulado: a) limo; b) escorias siderúrgicas; c) bentonita.</i>	153
<i>Figura 7-2 Expansión libre en mezclas bentonita-escoria en distintas relaciones: a) 2B:1SS; b) 1B:2SS; c) 1B:1SS.</i>	155
<i>Figura 7-3 Expansión libre en mezclas bentonita-escoria lavada, en distintas relaciones: a) 2B:1SS(w); b) 1B:2SS(w); c) 1B:1SS(w).</i>	156
<i>Figura 7-4 Desarrollo de reacciones puzolánicas medido a partir de ensayos en resistencia a la compresión simple- RCS – en muestras L-12% SS - 6% B a 0, 7, 28 y 56 días de almacenamiento.</i>	157
<i>Figura 7-5 Influencia del tiempo de curado en la compresibilidad de muestras L-12% SS – 6% B, permeados con agua destilada [W] (a) y lixiviado natural [LL] (b).</i>	161
<i>Figura 7-6 Influencia del tiempo de curado en la deformación de muestras L-12% SS – 6% B, permeados con agua destilada (a) y lixiviado natural (b).</i>	163
<i>Figura 7-7 Comportamiento hidráulico medido a partir de variaciones en el estado tensional de las muestras L- 12% SS - 6% B, permeadas con agua destilada (a), y lixiviado natural(b).</i>	166
<i>Figura 7-8 Comportamiento hidráulico de muestras L-12% SS-6% B con distinta densidad.</i>	168
<i>Figura 7-9 Influencia de la presencia de sales sobre el comportamiento hidráulico de muestras L-12% SS-6% B.</i>	170

Listado de tablas

<i>Tabla 2-1 Evaluación de actividad puzolánica de acuerdo a las variaciones medidas en términos de conductividad eléctrica [adaptado de Luxan et al., 1998].</i>	16
<i>Tabla 2-2 Composición química de las SS [extraído y adaptado de Gençel et al., 2021; Song et al, 2021].</i>	33
<i>Tabla 3-1 Caracterización sobre los materiales utilizados.</i>	51
<i>Tabla 3-2 Propiedades geotécnicas de los materiales.</i>	53
<i>Tabla 3-3 Fases identificadas por DRX realizado en el loess.</i>	55
<i>Tabla 3-4 Fases identificadas por DRX en la escoria.</i>	55
<i>Tabla 3-5 Fases identificadas por DRX en la bentonita CATAE. * Carbonatos indeterminados [Musso et al., 2010].</i>	56
<i>Tabla 3-6 Composición química de la escoria utilizada.</i>	62
<i>Tabla 3-7 Composición química de la bentonita utilizada, [adaptada de Musso et al., 2016].</i>	63
<i>Tabla 3-8 Concentración de elementos en el lixiviado.</i>	64
<i>Tabla 3-9 Características fisicoquímicas lixiviado - aportado por Cormecor (DQO: demanda química de oxígeno).</i>	65
<i>Tabla 3-10 Análisis biológico del lixiviado – aportado por Cormecor.</i>	66
<i>Tabla 3-11 Ensayos realizados en muestras.</i>	67
<i>Tabla 3-12 Ensayos realizados en muestras.</i>	67
<i>Tabla 3-13 identificación óptica.</i>	67
<i>Tabla 3-14 Probetas utilizadas para los ensayos de RCS en punto óptimo de la curva de compactación.</i>	78
<i>Tabla 3-15 Probetas de muestras L-12% SS utilizadas para los ensayos de RCS, analizadas con distinto contenido volumétrico de agua.</i>	78
<i>Tabla 3-16 Ensayos edométricos.</i>	79
<i>Tabla 3-17 Probetas para medición de succión.</i>	82
<i>Tabla 3-18 Mediciones de conductividad hidráulica en probetas edométricas compactadas al 80% EC.</i>	83
<i>Tabla 3-19 Determinación de propiedades hidráulicas en mezclas estabilizadas.</i>	85
<i>Tabla 3-20 Propiedades de las muestras L-SS-B en probetas de permeabilidad.</i>	86
<i>Tabla 5-1 Parámetros de compactación mezclas L-SS.</i>	113
<i>Tabla 5-2 Propiedades de las mezclas analizadas en RCS.</i>	120
<i>Tabla 5-3 Resumen de características de muestras analizadas con distinta humedad inicial.</i>	125
<i>Tabla 5-4 Propiedades medias de compresibilidad de las muestras L-12% SS.</i>	130
<i>Tabla 7-1 Propiedades de las muestras con 6% de adición de bentonita analizadas en RCS.</i>	159
<i>Tabla 7-2 Valores de succión obtenidos a través del método del papel de filtro.</i>	160
<i>Tabla 7-3 Propiedades edométricas de mezclas L-12% SS-6% B.</i>	162
<i>Tabla 7-4 Valores de RCS reportados para muestras de limo en diversas condiciones.</i>	172
<i>Tabla 7-5 Valores de K reportados para muestras de limo en diversas condiciones.</i>	173

1 INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN Y PLANTEO DEL PROBLEMA

Los sedimentos loésicos cubren aproximadamente un 10% de la superficie terrestre, abarcando 35% del territorio nacional [Li et al., 2020; Zárate, 2003]. Estos sedimentos finos de origen eólico se caracterizan por depositarse de manera suelta presentando abundantes macroporos. Debido a esta particularidad, los mismos presentan problemas de inestabilidad mecánica o colapso asociados a incrementos de carga y/o cambios de humedad [Zhou et al., 2014; Qi et al., 2018; Sadeghi et al., 2019]. Este fenómeno se encuentra vinculado a que las partículas están unidas entre sí por la acumulación o puentes de material arcilloso y sales precipitadas. La rigidez de estos contactos se reduce ante la presencia de agua, ya que las arcillas expanden y las sales precipitadas que cementan partículas vecinas se disuelven disminuyendo la resistencia al corte del suelo provocando que la estructura o esqueleto del mismo colapse [Rinaldi et al. 2007, Capdevilla, 2008].

Debido a que una gran cantidad de obras de infraestructura civil requieren de la utilización de este material como sustrato de apoyo o material de construcción, se requiere de la estabilización del mismo. El comportamiento geotécnico del suelo puede mejorarse a partir de técnicas mecánicas o químicas. La primera de ellas involucra la densificación del material mediante compactación, provocando la disminución de los vacíos y compresibilidad del mismo, aumentando su rigidez y resistencia. La segunda involucra reacciones químicas entre agentes estabilizadores y los minerales del suelo para lograr las mejoras deseadas. Sin embargo, estos métodos tienen asociados significativos impactos ambientales en términos de consumo de energía, consumo de recursos no renovables y/o procesos de contaminación.

Durante la última década se ha ido desarrollando mayor conciencia a nivel mundial acerca de la contaminación ambiental y cambio climático, tendiendo hacia una mirada de mayor sostenibilidad. A partir de la creciente industrialización y costos energéticos,

analizando las restricciones ambientales existentes, las técnicas emergentes buscan afrontar las problemáticas mencionadas investigando la posibilidad de reutilizar remanentes de diversos procesos productivos. En este sentido, el principal objetivo consiste en minimizar la disposición final de los mismos mediante un enfoque sostenible y amigable con el medio ambiente. En la actualidad prolongar la vida útil de un material considerado como desecho y darle valor es de suma importancia, de manera tal que el concepto de economía circular ha llamado la atención de investigadores, ciudadanía y gobernantes.

La producción de acero y acero inoxidable genera un residuo sólido conocido como Escoria de Acero (SS). La misma puede clasificarse según el tipo de acero como escoria de acero al carbono o escoria de acero inoxidable. A su vez, se puede clasificar según su proceso de fabricación como escoria de retiro, de horno de arco eléctrico, horno de refinado, alto horno o residuo de fundición [Chadwick 1988; Grubeša et al., 2016; Gençel et al., 2021]. Este subproducto se genera al separar la impureza del hierro fundido en la producción del laminado. En Argentina la principal productora de acero es la empresa “Ternium-Siderar”, quienes en el año 2018 fabricaban aproximadamente 230.000 toneladas de laminado por mes. En este proceso se extrae entre el 15 y 20% de dicha producción en escoria de acería lo que equivale aproximadamente a 45.000 toneladas de escoria mensual. Una fracción de las mismas se recupera y vende a la industria cementera, mientras que una fracción muy importante se dispone como residuo.

Hasta la fecha, con el creciente interés en la minimización del consumo de recursos naturales y debido a las características cementantes que presentan las escorias, las mismas comenzaron a ser consideradas en diversas aplicaciones ingenieriles [Yüksel, 2017; Guo et al., 2018]. Los estudios se han centrado en determinar la viabilidad del uso de SS como agregados utilizados en la construcción de carreteras o pavimentos, como agregados en concreto, o como materia prima en otros procesos productivos [Shen et al., 2009; Pasetto et al., 2017; Ferreira et al., 2016]. Sin embargo, el desarrollo del conocimiento sobre el comportamiento de las escorias de acería como agentes estabilizadores en suelos es reciente y escaso. El uso de estos residuos de acería en

diferentes procesos ayudaría a aliviar el problema de su eliminación y/o disposición e incluso ayudaría a la preservación de los recursos naturales.

Frente a este escenario esta Tesis busca generar conocimientos acerca de la viabilidad de reutilización de los remanentes generados en la industria de la acería para estabilizar los suelos loésicos que cubren el centro de Argentina.

1.2 OBJETIVOS DEL TRABAJO

El propósito de esta investigación es estudiar el comportamiento de materiales residuales pertenecientes a la industria siderúrgica. El objetivo general se encuentra ligado a la determinación de la viabilidad de la reutilización de las escorias de la industria de la acería para mejorar y estabilizar los suelos limosos de origen loésico como los que cubren el centro y este de la superficie Nacional. Para ello se busca cuantificar el efecto de la mejora determinando parámetros geotécnicos del suelo estabilizado.

Los objetivos específicos planteados, con el propósito de generar nuevos conocimientos sobre el comportamiento de mezclas compactadas de suelos limosos estabilizados con residuos siderúrgicos, pretenden:

- ✓ Investigar los mecanismos de interacción limo-escoria y las modificaciones que ocurren a nivel microscópico en muestras compuestas y determinar la influencia del tiempo en las reacciones entre los materiales que componen la mezcla.
- ✓ Evaluar la influencia de la adición de los residuos en mezclas limo-escoria en distintas proporciones a través de parámetros mecánicos resistentes, a partir de resistencia a la compresión simple y compresión confinada.
- ✓ Cuantificar cambios en las propiedades físicas de las mezclas compactadas, verificando el desarrollo de reacciones puzolánicas que generen cementación natural de las mezclas.
- ✓ Determinar la relación entre cambios producidos por las reacciones entre el limo y la escoria siderúrgica que ocurren a nivel de micro escala con comportamientos emergentes a macro escala, tales como aumentos de rigidez, presión de fluencia

y/o resistencia de las muestras compactadas, con el envejecimiento de las mismas

- ✓ Cuantificar el efecto que producen los hidrogeles generados durante las reacciones puzolánicas en la colmatación física de los poros del suelo, los cuales restringen el paso de líquidos permeantes y disminuyen la conductividad hidráulica.
- ✓ Verificar las ventajas potenciales de adicionar escorias siderúrgicas en mezclas de limo-arcilla compactadas, frecuentemente utilizadas para la construcción de barreras aislantes o de baja conductividad hidráulica. En este aspecto se busca cuantificar los efectos que produce la adición de escoria en la resistencia, presión de fluencia y conductividad hidráulica de las mezclas compactadas.

1.3 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

En el Capítulo 2 se presenta el estado actual de conocimiento vinculado al contenido de la presente Tesis. En una primera instancia se describe el principal fenómeno que ocurre en el proceso de estabilización de suelos. Para ello se analiza el mecanismo de reacción puzolánica clasificando los materiales puzolánicos en base a su actividad, identificando las fases del proceso y las condiciones bajo las cuales ocurre la reacción. En una segunda instancia se presentan los avances y desarrollos actuales relacionados con las técnicas utilizadas para estabilizar suelos de grano fino, el cual representa una de las mayores problemáticas en el ámbito ingenieril. Se resumen los aspectos de mayor relevancia vinculados a procesos de estabilización mecánica y química, mencionando y analizando las problemáticas asociadas al consumo de cemento y cal como agentes estabilizadores. En este marco se presentan las tendencias actuales que tienden al desarrollo sostenible, incluyendo la estabilización de suelos mediante la adición de residuos. Se clasifican los residuos de la industria siderúrgica mencionando usos y aplicaciones de las mismas como estabilizantes. Se presenta una recopilación bibliográfica acerca de los limos loésicos de la provincia de Córdoba, Argentina, sus principales propiedades con énfasis en las técnicas utilizadas para su estabilización o para lograr mejoras en algunas de sus propiedades físicas o mecánicas cuando es utilizado como material de construcción.

En el Capítulo 3 se resumen las principales propiedades de los materiales granulares y fluidos utilizados en la presente Tesis. Se presentan las características físicas y mineralógicas de los limos loésicos, escorias siderúrgicas y bentonitas. Se detallan además los procedimientos aplicados para la realización de los ensayos de caracterización, como para evaluar las reacciones y cambios que ocurren en las mezclas de limo-escoria y limo-escoria bentonita compactadas. Se presenta además un detalle de las normativas de ensayos utilizados en la presente Tesis.

El Capítulo 4 presenta el análisis relacionado con el mecanismo de reacción puzolánica que ocurre en las muestras de suelo estabilizado. Se muestra la variación de los índices de actividad puzolánica de los materiales utilizados y se relacionan los resultados obtenidos con la composición de las fases de la mezcla, en particular con la presencia de trizas volcánicas en la fracción de limo loésico. Se evalúan los cambios que sufre la mezcla de limo compactada con escorias a través de observaciones de microscopía confocal que permite monitorear la evolución de los productos de cementación con el paso del tiempo. Se identifican diferentes productos de reacción en los bordes o contactos entre la escoria y la matriz fina de limo que la contiene a partir de análisis mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). Por último, se cuantifica el efecto de la formación de hidrogeles en la unión entre partículas que emerge como cambios en la granulometría de las mezclas las cuales se vinculan con los procesos de cementación natural asociada con las reacciones puzolánicas que se desarrollan en los poros de la mezcla.

En el Capítulo 5 se muestra la influencia de la adición de escorias siderúrgicas en el comportamiento mecánico a largo plazo del loess compactado. Se analiza el comportamiento tenso-deformacional de las muestras a partir de ensayos de resistencia a la compresión simple y ensayos de compresión confinada. Se analiza la influencia del contenido escorias en las muestras, el tiempo de curado y la humedad de amasado en las mismas.

El Capítulo 6 presenta el comportamiento hidráulico de las muestras de limo compactado estabilizado con escorias. Se analiza la influencia del envejecimiento y

formación de hidrogeles en el comportamiento a largo plazo de muestras permeadas con distintos fluidos. Se evalúa el comportamiento mecánico-hidráulico acoplado analizando la influencia del envejecimiento sobre diversos estados tensionales, discutiendo el mecanismo que gobierna las variaciones en el flujo a partir del modelo de Kozeny-Carman.

En el Capítulo 7 se evalúa la potencial aplicación de mezclas de limo-bentonita compactadas a las cuales se les adiciona escorias siderúrgicas. Se analiza su comportamiento y se demuestra la potencial aplicación de las mezclas para la construcción para barreras aislantes en rellenos sanitarios. Se analiza el efecto que presentan las escorias sobre el fenómeno de expansión característico de las arcillas a partir de ensayos de expansión libre. Se evalúa el efecto del envejecimiento y desarrollo de hidrogeles en los poros del suelo en el comportamiento mecánico-hidráulico de la muestra compactada.

El Capítulo 8, finalmente, presenta los principales aportes de esta Tesis obtenidos de los diferentes análisis realizados. Se discuten las conclusiones obtenidas y se mencionan recomendaciones para futuros trabajos de investigación vinculados a los aportes al conocimiento generados en este trabajo.

La Figura 1-1 presenta un esquema general de la metodología de trabajo, donde se resumen los trabajos realizados en el presente trabajo de investigación.

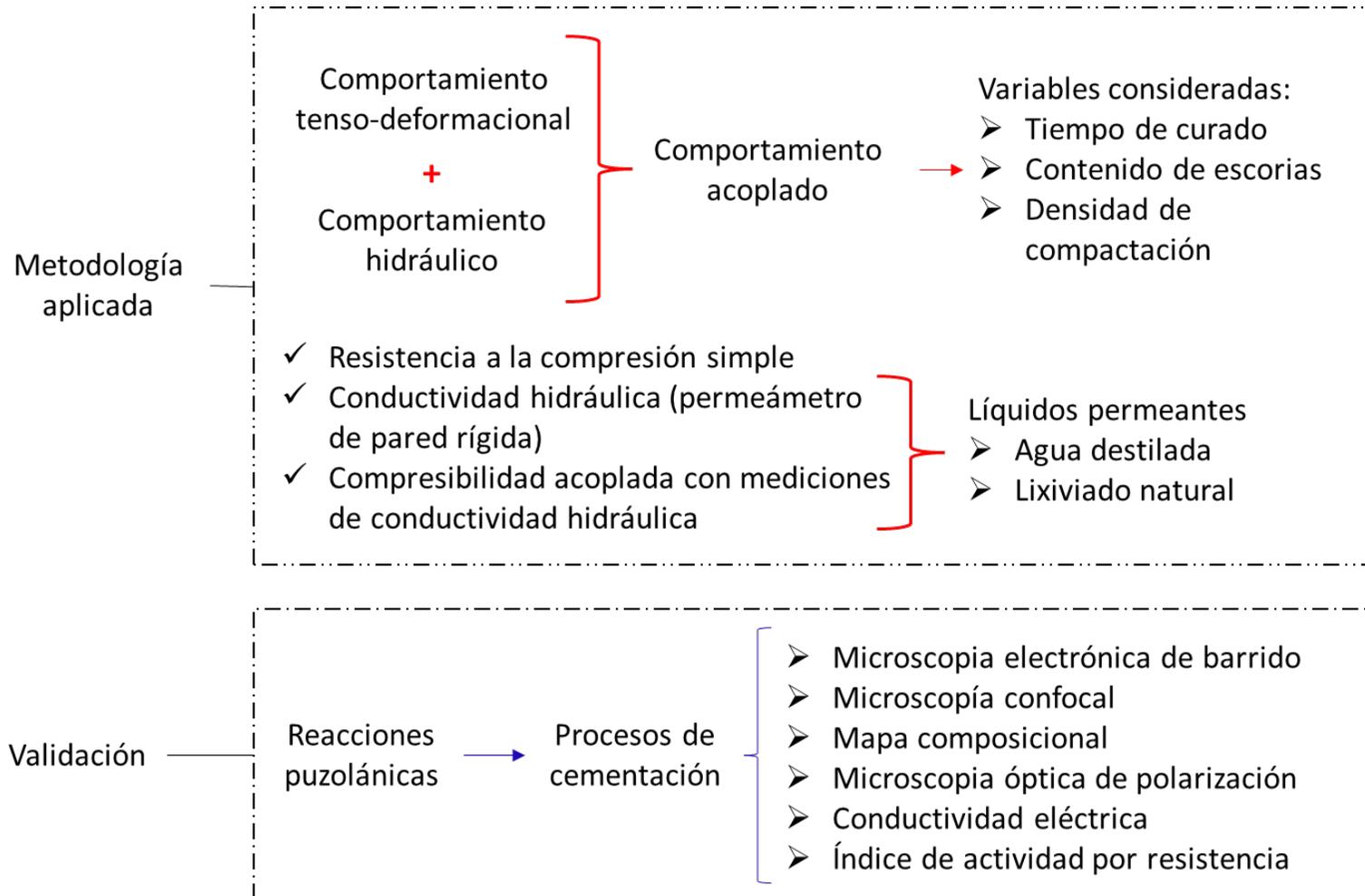


Figura 1-1 Esquema de la metodología de trabajo.

2 ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

2.1 INTRODUCCIÓN

El fenómeno de estabilización de suelos representa en la actualidad uno de los principales desafíos en el ámbito de la ingeniería Geotécnica. Mediante la estabilización se busca mejorar las propiedades físicas y/o mecánicas con el objeto de satisfacer requerimientos de diseño para poder utilizar los suelos locales como material de construcción.

En este Capítulo se presenta la revisión bibliográfica relacionada a los fenómenos de estabilización de suelos con las problemáticas asociadas y los enfoques actualmente utilizados. En una primera instancia se desarrollan aspectos vinculados a las reacciones puzolánicas que gobiernan la mayoría de los procesos de estabilización, mencionando cómo se pueden clasificar los materiales puzolánicos y cómo es posible identificar si un material presenta o no puzolanidad.

En una segunda instancia se mencionan los métodos existentes y comúnmente utilizados para lograr la estabilización de suelos finos, ya sea mediante procesos mecánicos o bien a partir de la adición de materiales que fomenten las reacciones químicas en estos suelos, indicando la ventajas y desventajas asociadas. En este marco se presenta la problemática mundial vinculada a los fenómenos de estabilización química mediante la adición de cemento o cal, relacionada con el potencial riesgo ambiental que conlleva. A partir de esta problemática surgen diversas opciones vinculadas a la reutilización de desechos de diversas industrias, lo cual es analizado en esta sección.

Se analizan las características que presentan las escorias siderúrgicas, las cuales son consideradas residuos en la industria del acero, evaluando las distintas aplicaciones que existen al día de la fecha para minimizar la disposición final de las mismas.

Finalmente, focalizando el Capítulo en los objetivos de este trabajo, se presenta información recopilada acerca de los suelos loésicos locales de la provincia de Córdoba, mencionando su origen, distribución y procesos de formación. Se analizan a su vez los fenómenos de estabilización que se requieren para mejorar propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas del estrato y mencionando su potencial uso como material de construcción.

2.2 REACCIONES PUZOLÁNICAS

Una reacción puzolánica es una reacción química que ocurre en presencia de una puzolana. Las puzolanas o materiales puzolánicos se definen como materiales silíceos o alumino-silíceos que por sí solos poseen nulo o bajo valor cementante, pero que, en condiciones ideales finamente divididos y en presencia de humedad, presentan la posibilidad de reaccionar químicamente con hidróxido de calcio a temperatura ambiente formando, como resultado, compuestos con propiedades cementantes [ASTM C618, 2022].

En este sentido, la actividad puzolánica depende principalmente de la cantidad de sílice amorfa y alúmina en la composición del material puzolánico [Agarwal, 2006]. Sin embargo, la reacción puzolánica también puede verse afectada por otras propiedades, como ser la superficie específica y/o la distribución del tamaño de partículas [Tironi et al., 2013]. De acuerdo a estas definiciones es posible identificar que existen ciertas condiciones que deben coexistir para que este tipo de reacciones ocurran. Estas condiciones se pueden resumir como se enuncia a continuación:

- Necesidad que exista determinada finura del material;
- Presencia de un agente activador que genere ambiente de elevado pH que favorezca la solubilización de los compuestos silíceos;
- Humedad o presencia de agua en el medio.

2.2.1 Clasificación de las puzolanas

El término puzolana hace referencia a todos aquellos materiales inorgánicos, que se endurecen en agua cuando se mezclan con hidróxido de calcio o bien, con materiales que puedan liberar hidróxido de calcio. Estos materiales pueden clasificarse en función de su origen, encontrando por un lado puzolanas de origen natural o bien, por otro lado, puzolanas de origen artificial como se ilustra en la Figura 2-1.

Las primeras son aquellas que no requieren ningún tratamiento extra para que se comporten como materiales reactivos, mientras que las segundas resultan de modificaciones químicas o estructurales de materiales que originariamente no presentaban puzolanidad.

En el caso de las puzolanas naturales, las mismas provienen principalmente de materiales rocosos piroclásticos, como las cenizas volcánicas, tobas volcánicas, piedra pómez, obsidianas, entre otras. En estos materiales predomina la sílice amorfa o vidrio volcánico generado a partir del enfriamiento brusco del magma. A partir de procesos de erosión y meteorización estos materiales generan (in-situ o luego de procesos de transporte), depósitos naturales con elevados contenidos de materiales zeolíticos y/o arcillosos con proporciones variables de vidrio relíctico.

Las puzolanas artificiales o industriales, en cambio, son el resultado de producciones industriales o materiales tratados térmicamente. Dentro de este grupo es posible identificar, por ejemplo, las cenizas provenientes de la combustión de carbones, bitúmenes de hidrocarburo, centrales térmicas o bien escorias producto de la producción de hierro. Estos materiales que se caracterizan por presentar una gran actividad puzolánica contienen suficientes aluminosilicatos amorfos que reaccionan con el hidróxido de calcio en presencia de agua para formar productos de hidratación [Omran et al., 2018; Kasaniya et al., 2021]

En cualquiera de los casos, estos materiales se encuentran formados por dos fases: una fase activa y una fase inerte, según sean capaces (o no) de reaccionar con el hidróxido de calcio Ca(OH)_2 [Massazza, 1993]. Las propiedades de estos materiales dependen,

entonces, de la composición química, de la estructura interna y de la mineralogía que presenten, es decir de la proporción vítrea o amorfa que manifiesten.

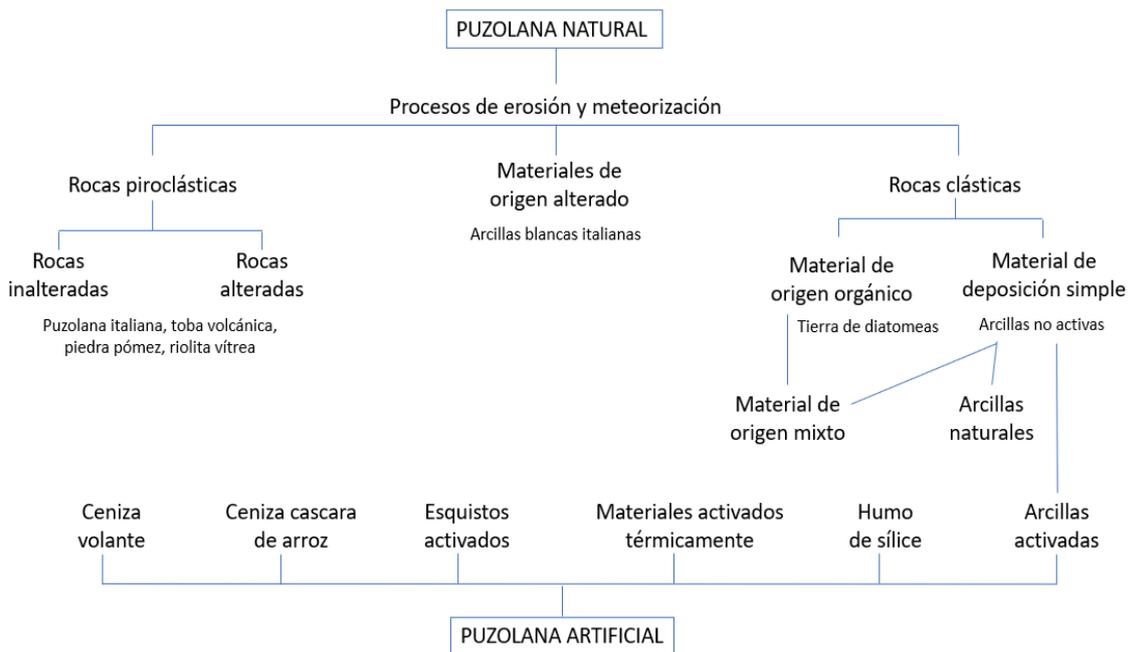


Figura 2-1 Clasificación de puzolanas [adaptado de Massazza, 1993; Snelings et al., 2012].

El uso común de estos materiales inorgánicos permite denominarlos como cementantes suplementarios que contribuyen a las propiedades de una mezcla cementicia a través de la actividad hidráulica, puzolánica o ambas [Walker y Pavía, 2011]. En este marco, al hablar de reacción puzolánica se hace mención a procesos que se encuentran descritos en términos de mezclas de cemento y hormigón. El uso del término suplementario hace referencia a la función de suplementar o complementar que poseen estos elementos en relación, principalmente, a procesos de cementación en las mezclas, pudiendo potenciar las propiedades de la misma o bien suplir alguna deficiencia en ella.

Dentro de esta clasificación es posible encontrar materiales como el cemento Portland, cenizas volantes, puzolanas naturales o artificiales, humo de sílice y/o la escoria granulada de alto horno [Black, 2016]. La Figura 2-2 presenta la composición química básica de estos materiales cementicios suplementarios. Los materiales puzolánicos se caracterizan, comúnmente y a excepción de la cal, por presentar un contenido de calcio más bajo que el cemento Portland. En general, se denomina material cementante a

aquel capaz (por sí solo o en combinación con otros materiales) de formar productos de hidratación como hidratos de silicato de calcio, hidratos de aluminosilicatos o también hidratos de aluminosilicatos de calcio. En este sentido, y dependiendo de la composición química del material utilizado, existen diferencias en los productos de hidratación resultantes que se forman [Lothenbach et al., 2011; Snellings et al., 2012].

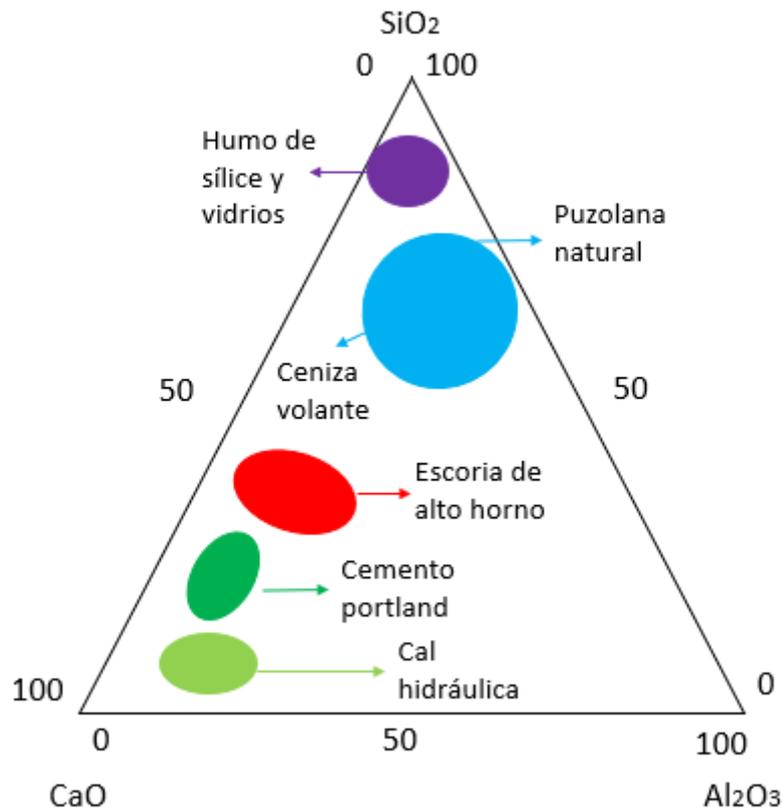


Figura 2-2 Composición química de los materiales suplementarios [adaptado de: Deloye, 1993; Quintana Crespo, 2005; Lotenbach et al., 2011; Black et al., 2016].

Por lo general, en la selección de un material puzolánico se prefieren aquellos con composición química tal que la presencia de los tres principales óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) sea mayor del 70% a la vez que presenten una estructura amorfa de manera de asegurar de esta forma que se promueva la actividad puzolánica [ASTM C618, 2022]. A partir de estas reacciones es posible favorecer la cementación de los agregados o materiales granulares.

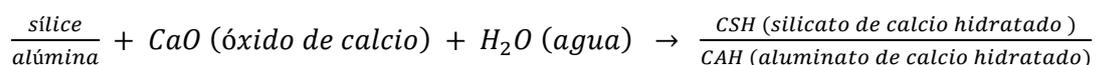
2.2.2 Actividad puzolánica

La actividad puzolánica se define como la habilidad o capacidad de los materiales, tanto naturales como artificiales, para producir componentes que tienen propiedades de unión o cementante como resultado de su reacción con hidróxido de calcio en presencia de humedad [Uzal et al., 2010].

El desempeño de los materiales de cementación suplementarios en cementos combinados y mezclas de hormigón depende de varios factores. Dentro de los mismos se menciona la distribución del tamaño de partículas, el área superficial que controla tanto el requerimiento de agua, la reología y la tasa de actividad puzolánica [Mboya et al., 2017; Snehal y Das, 2022]. En este sentido, un área superficial más alta y un tamaño de partícula más pequeño, pueden asegurar que se desarrollen las reacciones químicas de manera más rápida.

Las partículas más finas tienden a aumentar la tasa de hidratación al proporcionar un mejor empaquetamiento de partículas y al aumentar los sitios de nucleación [Elahi et al., 2021]. Esta tasa de actividad puzolánica influye en distintas propiedades de la mezcla como ser su resistencia a compresión simple, su permeabilidad y la durabilidad química [Massazza, 1998].

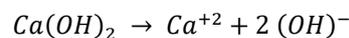
El progreso de la reacción entre el CaO y las fases activas de una puzolana en presencia de agua se puede controlar midiendo la cantidad de estos óxidos libres consumidos en el sistema en función de la composición mineralógica y la cantidad de material puzolánico, contenido de SiO₂ y el período de curado en el cual se desarrollan estas reacciones. El mecanismo de reacción puzolánica puede ser esquematizado como se indica a continuación:



Esta reacción, que conlleva la solubilización de los componentes de sílice y alúmina amorfos (o pobremente cristalizados), requiere como condición la existencia de un

medio acuoso alcalino dando lugar a la formación de aluminosilicatos dicálcicos y tricálcicos similares a los que se obtienen en el proceso de fraguado del cemento Portland (silicatos de calcio (CSH) / aluminosilicatos de calcio hidratados (CAH)) [Pacewska y Wilińska, 2020]. Este mecanismo es un proceso a largo plazo, que puede durar meses o años dependiendo del tipo y tamaño de los materiales puzolánicos [Walker y Pavía, 2011].

El proceso mediante el cual ocurre esta formación puede ser dividido en tres etapas fundamentales. En una primera instancia ocurre la disolución de sílice mediante un mecanismo de “ataque”, transformando su estructura de SiO_2 a SiO_2OH^- . En esta etapa, la presencia de agua facilita la disolución y posterior incorporación de la misma a los productos resultantes. En una segunda instancia, durante una etapa de “difusión”, el ion liberado se difunde en la solución alcalina; la presencia de los iones Ca^{2+} genera cierta inestabilidad termodinámica favoreciendo la cristalización de los iones de silicato y aluminato. Esta tercera y última etapa genera la formación de una capa ligante, dando origen a la cementación entre las partículas. La acción resultante de estas etapas puede ser resumida de la siguiente forma [National Research Council, 1987]:



La solubilidad de los compuestos de sílice depende del tamaño de partículas, del grado de cristalización y de la alcalinidad del medio. Por un lado, cuando la estructura de un sólido se encuentre cristalizada, es decir que sus átomos se encuentran ordenados y estables, disminuye su grado de solubilización. Por otro lado, cuanto mayor sea el pH del medio en el cual ocurre la reacción, es decir, a mayor alcalinidad, la solubilidad de los compuestos aumenta favoreciendo la reacción puzolánica. De esta forma, cualquier sustancia que suministre cationes alcalinos, elevando el nivel de pH facilitando el proceso de disolución, tiende a favorecer en manera indirecta la cementación de las partículas [Elahi et al., 2021].

La Figura 2-3 presenta la relación que existe entre la alcalinidad del medio y la solubilidad de los compuestos silíceos. A valores de pH próximos a 10, como puede observarse, la solubilidad de los compuestos comienza a crecer exponencialmente. Esto indica que la adición o incorporación de elementos que eleven el pH del medio facilitan la disolución de componentes de sílice y alúmina presentes, favoreciendo las reacciones mencionadas [Chan, 1989].

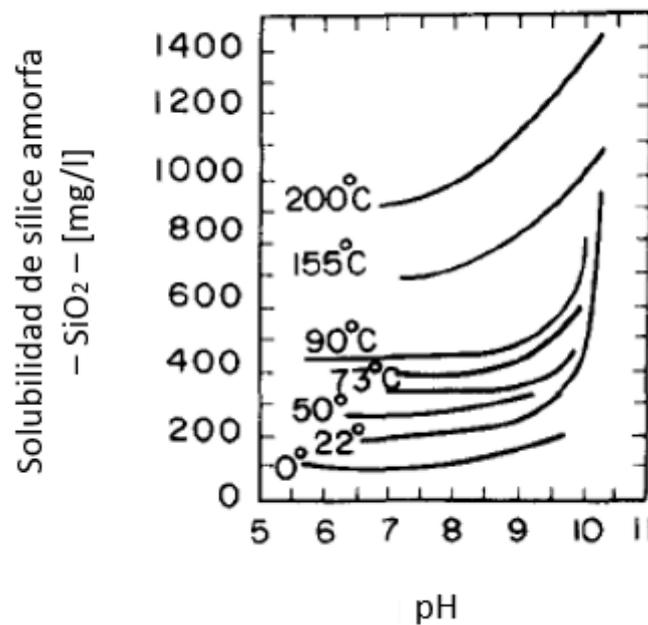


Figura 2-3 Solubilidad de los compuestos de sílice amorfa en función de la temperatura y pH del medio – [extraído y adaptado de Chan, 1989].

Existen diversos procedimientos indirectos que permiten determinar la actividad puzolánica de los materiales a partir de mediciones de conductividad o resistividad eléctrica (CE). Entre ellos se encuentra el método propuesto por Luxan y colaboradores, [Luxan et al., 1989] que permite clasificar los materiales en función de la variación detectada en las mediciones de conductividad eléctrica.

La aplicación de este método consiste en medir la conductividad eléctrica de una solución de 200 ml saturada en Ca(OH)₂ a 40 ± 1 °C a partir de añadir 5 g del material del cual se quiere conocer su actividad puzolánica. Durante el ensayo se debe mantener la solución en agitación constante. A partir de las mediciones es posible identificar la

puzolanicidad de los materiales en función de la variación de conductividad eléctrica a 0 y 120 segundos de comenzado el ensayo. Cuando esta variación es menor a 0,4 el material se clasifica como no puzolánico; entre 0,4 y 1,2 se considera material de puzolanicidad variable y, por último, con variaciones que superan 1,2 se considera material con buena puzolanicidad, (Tabla 2-1).

Tabla 2-1 Evaluación de actividad puzolánica de acuerdo a las variaciones medidas en términos de conductividad eléctrica [adaptado de Luxan et al., 1998].

Clasificación	Variación de CE (ms/cm) $[\Delta C]$
Sin actividad puzolánica	$\Delta C < 0,4$
Actividad puzolánica variable	$0,4 < \Delta C < 1,2$
Buena actividad puzolánica	$\Delta C > 1,2$

2.3 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS DE GRANO FINO

En muchas regiones del mundo la accesibilidad a suelos de buena calidad utilizados en el ámbito de la construcción resulta limitada representando un desafío para la ingeniería geotécnica [Latifi et al., 2017]. En este marco, la estabilización de suelos representa una de las mayores problemáticas a resolver dentro del ámbito ingenieril debido a la estabilidad y la serviciabilidad a largo plazo de las estructuras que se cimentan sobre el suelo [Reiterman et al., 2022].

El principal objetivo del proceso consiste en lograr las propiedades ingenieriles necesarias para el suelo. Al mismo tiempo, deben considerarse aspectos económicos e impactos ambientales asociados al proceso [Mohamed et al., 2022]. En todos los casos el objeto radica en buscar alternativas para la estabilización de los suelos localmente disponibles [Latifi et al., 2017]. En este sentido, la estabilización del suelo se puede definir como la alteración o preservación de una o más propiedades del suelo para mejorar las características de ingeniería y el rendimiento del mismo.

Las técnicas de estabilización pueden resumirse en dos categorías básicas: la primera consiste en un proceso mecánico mientras que la segunda implica la ocurrencia de procesos químicos. En ambos casos, el objetivo se vincula a la modificación de la fábrica

y textura del suelo estabilizado, permitiendo lograr mayores resistencias y durabilidad [Rahmat et al., 2015].

2.3.1 Estabilización mecánica

La estabilización mecánica se basa en procesos físicos con el objeto de mejorar alguna propiedad geotécnica del suelo. Dentro de este grupo las alternativas comunes incluyen la mezcla de suelo y la compactación. En el primer caso se busca corregir la granulometría generando un nuevo material apto para el fin que se busca (p. ej. base de un camino). Este método resulta de mayor economía y mayor conveniencia para alterar las propiedades físicas y mecánicas de un suelo. Cuando esta técnica no resulta factible o no produce un material de suelo satisfactorio, se debe considerar la estabilización con geotextiles o mezclas químicas [Onyelowe et al., 2006].

La estabilización mediante compactación en cambio puede lograrse mediante procesos dinámicos, estáticos o por amasado, tanto en laboratorio como in-situ. Este proceso comprende la densificación de un suelo a través de la expulsión de aire reduciendo la proporción de vacíos a partir del uso y aplicación de compactadores mecánicos, rodillos y apisonadores [Budhu, 2020; Shimobe y Spagnoli, 2020]. El proceso requiere, además, la determinación del contenido óptimo de humedad para la compactación, el cual debe reproducirse luego “in-situ” en el suelo a estabilizar.

Las principales ventajas asociadas a los procesos de estabilización mecánica están relacionadas a aminorar o prevenir la ocurrencia de procesos de asentamientos diferenciales, aumentando la resistencia del suelo mejorando su estabilidad, así como su capacidad de carga a la vez que se logran controlar los cambios de volumen [Holtz y Kovacs, 1981; Spagnoli y Shimobe, 2020].

La estructura y, por lo tanto, las propiedades ingenieriles resultantes de los suelos finos cohesivos compactados dependen en gran medida del método o tipo de compactación, del esfuerzo de compactación aplicado, del tipo de suelo y del contenido de agua de moldeo. En el caso de suelos arcillosos o finos se identificó que, para un mismo esfuerzo de compactación, con un contenido de agua creciente (rama húmeda), la fábrica del

suelo se vuelve cada vez más orientada mientras que, a medida que disminuye el contenido de agua de la mezcla (rama seca) la fábrica de suelo tiende a tomar una estructura floculada.

En cuanto a la permeabilidad de estos suelos compactados, se observó que a medida que se incrementa el esfuerzo de compactación, el coeficiente de permeabilidad disminuye. Esta tendencia se atribuye a que la relación de vacíos se reduce (aumentando el peso unitario seco), siendo que al compactar la muestra sobre la rama seca se obtienen coeficientes de permeabilidad mayores. En arcillas bentónicas, esta diferencia puede alcanzar 3 órdenes de magnitud [Mitchell et al., 1965], mientras que en los limos del centro de Argentina esta diferencia puede alcanzar un orden de magnitud [Francisca et al., 1998].

Por otro lado, considerando su comportamiento mecánico, se detectó que la resistencia de suelos finos compactados sobre la rama seca es mayor que en la rama húmeda para una misma relación de vacíos, siendo su comportamiento del tipo frágil [Holtz y Kovacs, 1981]. De manera opuesta, en los suelos compactados sobre la rama húmeda el comportamiento identificado resulta de tipo dúctil.

2.3.2 Estabilización química

La estabilización química se basa en el uso de adiciones con el objeto de alterar las propiedades químicas del suelo para lograr el efecto deseado. Bajo esta categoría, el proceso depende principalmente de las reacciones químicas entre el estabilizador y los minerales del suelo para lograr las mejoras buscadas. Esta técnica representa el método más común para tratar los suelos. Su principal objetivo es buscar la estabilidad de los mismos, los cuales son utilizados comúnmente en proyectos de ingeniería ya sea en obras viales, como materiales de fundación o bien en obras relacionadas con el medio ambiente como por ejemplo sistemas de barreras para rellenos sanitarios.

Una de las técnicas frecuentemente utilizada consiste en adicionar materiales aglutinantes como cemento o cal, que estimulen la cementación directa de las partículas del suelo aumentando su resistencia, disminuyendo su permeabilidad y compresibilidad

[Yi et al., 2015]. Esta opción de estabilizar suelos en proyectos de construcción hace que los mismos sean considerados de mayor rentabilidad y sostenibilidad [James, 2020].

Los agentes estabilizantes pueden ser clasificados como ligantes primarios o secundarios, también conocidos como hidráulicos o no hidráulicos, en función de su reacción al entrar en contacto con agua o bien si, en presencia de minerales puzolánicos, reaccionan con el agua presente en el medio para formar compuestos cementosos. Dentro de este grupo de materiales aglutinantes se distingue el uso de cemento y de cal, los cuales logran, a partir de procesos puzolánicos y/o intercambio catiónico alterar y estabilizar el suelo. El primer fenómeno, reacciones puzolánicas, ocurre cuando los materiales de silicato y aluminato reaccionan químicamente con hidróxido de calcio a temperaturas constantes formando sustancias cementosas. El segundo, intercambio de cationes, ocurre solo cuando el suelo es capaz de intercambiar cationes libres presentes en los sitios de intercambio [Mohamed et al., 2022].

2.3.2.1 Mejoras a partir de la adición de cemento

La adición de cemento en suelos finos favorece a la generación de un material con una estructura estable a partir de la formación de vínculos y uniones entre las partículas generando un esqueleto con mayor rigidez y resistencia [Guetalla et al., 2006]. A partir de este fenómeno de cementación se busca mejorar las propiedades de los suelos locales con el objeto de que puedan ser utilizados en obras civiles. Esta mezcla de suelo-cemento puede considerarse como una mezcla de fases no homogéneas con propiedades mecánicas controladas por la cantidad de cemento añadido, la porosidad final, contenido de humedad y el periodo de curado [Cui et al., 2017; Cardoso et al., 2017; Constantini et al., 2022].

La relación agua/cemento óptima cambia con el contenido de cemento, presentando por lo general una relación no lineal. De acuerdo con diversos autores, el contenido de agua óptimo del suelo estabilizado con cemento ($C_{w(op)}$) debe encontrarse dentro de cierto rango para garantizar uniformidad, resistencia y rigidez, pudiendo definirse como [Wang et al., 2022]:

$$C_{w(op)} = N w_L \quad [2-1]$$

siendo “N” un factor de aumento del contenido de agua que oscila entre 1,0 y 1,2, mientras que “w_L” es el límite líquido para el tiempo de curado de 0 horas del suelo estabilizado.

En estas mezclas, el contenido de agua de moldeo resulta relevante para la compactación e hidratación del cemento portland, influyendo directamente sobre las propiedades mecánicas y térmicas del suelo-cemento estabilizado [Constantini et al., 2022]. Cuando el agua se mezcla con el cemento, se forman compuestos cementantes de silicato de calcio hidratado (CSH) y aluminato de calcio hidratado (CAH), liberando exceso de hidróxido de calcio (Ca(OH)₂) como producto del proceso de hidratación. La formación de estos productos ocurre horas después de que las partículas de cemento entran en contacto con las moléculas de agua, siendo que los cristales continuarán formándose siempre que queden partículas de cemento sin reaccionar y agua libre dentro de la mezcla [Naidu et al., 2021].

Debido a la hidratación del cemento, la resistencia al corte del suelo se incrementa a la vez que disminuye su permeabilidad a temperatura ambiente [Yu et al., 2022]. Reportes aseguran que la adición de 2, 4 y 6% de cemento en suelos limo-arenosos logran incrementar 286, 309 y 341% los valores de resistencia a la compresión simple al cabo de 28 días de curado [Kulkarni y Mandal, 2022], siendo que el módulo resiliente del suelo tratado con 6% de cemento resultó mayor que en las otras muestras analizadas, exhibiendo mayor rigidez y módulo elástico.

En el caso de tratar con suelos expansivos, estudios revelaron que en mezclas con contenidos de cemento superiores al 8% se logra disminuir la plasticidad y la resistencia y durabilidad cuando se adicionan contenidos de agua óptimos [Bahar et al., 2004]. Además, se identificó que la incorporación de este aglutinante en suelos expansivos representa una mejora significativa en las propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión simple, tenacidad y módulos de deformación al cabo de 7 y 28 días de curado [Chenarboni et al., 2021].

Por otro lado, al trabajar sobre suelos limo-arcillosos se corroboró, mediante observaciones por SEM, que adiciones de cemento inferiores al 3% no generan productos de hidratación suficientes para lograr modificaciones en la microestructura de la muestra compactada. A medida que el contenido de cemento se incrementa, la cantidad de productos de hidratación que se forman en la muestra aumentan significativamente ocupando los poros inicialmente vacíos, incrementando por consiguiente la resistencia de las mismas [Horpibulsuk et al., 2010]. Este incremento observado resultó ser proporcional entre el incremento de resistencia y la disminución de poros vacíos hasta cantidades próximas a 15% de cemento Portland; superado este porcentaje de adición estos incrementos se vuelven insignificantes. Esto se encuentra vinculado a que el aumento del contenido de cemento reduce significativamente el contenido de agua, lo que disminuye el grado de hidratación y, por tanto, la formación de productos cementicios, concluyendo que, para un determinado contenido de agua, el aporte de cemento en exceso es inútil.

Varios autores concluyen que la resistencia mecánica de las mezclas suelo-cemento dependen del tipo de suelo, mineralogía y contenido de partículas finas. Los mismos remarcan que, por general, a mayor contenido de cemento es posible obtener mayor resistencia a la compresión simple. La principal problemática mecánica asociada a este proceso de estabilización de suelos con cemento radica en que la muestra se vuelve quebradiza [Liu y Starcher, 2013], con lo cual, si bien permite mejorar su comportamiento mecánico, en algunas ocasiones es necesario solucionar el problema de la ductilidad de la mezcla a partir de la adición de fibras [Kulkarni y Mandal, 2022].

Por lo general, la influencia del tiempo de curado, densidad de suelo, tipo de cemento y reacciones químicas son determinadas en condiciones de laboratorio a partir de ensayos de compresión no confinada. Estas mejoras son ideales cuando se trabaja en condiciones controladas como en el caso de las experiencias de laboratorio. Sin embargo, al aplicar el contenido de cemento y humedad de compactación óptimas en campo, las mejoras en las propiedades del suelo suelen verse ligeramente disminuidos [Ho et al., 2017, Hasan et al., 2022].

2.3.2.2 Mejoras a partir de la adición de cal

La estabilización con cal hace referencia al proceso de mejorar las propiedades del suelo mediante la adición de productos de piedra caliza quemada, ya sea óxido o hidróxido de calcio ($\text{CaO} - \text{Ca}(\text{OH})_2$) [Al-Swaidani et al., 2016]. La reacción química cal-suelo se compone principalmente de dos etapas. La primera, inmediata o a corto plazo, ocurre unas pocas horas o días después de agregar la cal. Esta etapa abarca tres reacciones químicas principales: intercambio catiónico, floculación y aglomeración y carbonatación. La segunda etapa, reacción puzolánica, requiere de más tiempo para su desarrollo [Latifi et al., 2018; Hezmi et al., 2019].

La adición de este producto en suelos expansivos fomenta el fenómeno de floculación a partir del cual se modifican las propiedades ingenieriles de la mezcla. En presencia de agua se producen reacciones que involucran intercambios catiónicos, floculación y carbonatación junto con el desarrollo de reacciones de tipo puzolánico. A partir del intercambio catiónico entre los cationes asociados a las superficies de las partículas de arcilla y los cationes de calcio presentes en la cal, las partículas de arcilla se acercan formando flóculos lo cual es responsable de la modificación en las propiedades de la mezcla [Ghobadi et al., 2014]. Estas reacciones que ocurren entre los iones de calcio de la cal y los iones metálicos en la superficie de las partículas de arcilla dan lugar, por un lado, a una reducción en el potencial de hinchamiento, a la vez que libera oxhidrilos aumentando la alcalinidad del suelo estimulando las reacciones de tipo puzolánica que favorecen el incremento de resistencia del suelo [Hozatlioğlu y Yılmaz, 2021].

La presencia de pequeños porcentajes de cal en suelos arcillosos reduce, además, el contenido de agua y plasticidad de los mismos, mejorando la trabajabilidad a la hora de preparar capas de suelo compactadas [Ciancio et al., 2014; Al-Swaidani et al., 2016]. Si bien las propiedades del material estabilizado dependen del tipo de aditivo utilizado y de la naturaleza puzolánica del suelo a tratar, se observó que la presencia de este aglutinante genera incrementos en la resistencia al corte, disminuye la compresibilidad, hinchazón y contracción [Indiramma et al., 2020]. De manera similar a lo que ocurre con

las mezclas estabilizadas con cemento, cuando la trabajabilidad de la muestra resulta afectada se recurre a la adición de fibras como refuerzo [Boobalan y Devi, 2022].

Algunos estudios revelaron que el porcentaje de cal necesario para la máxima modificación de suelos arcillosos oscila entre 1 y 3% de cal por peso, siendo que porcentajes superiores de adiciones, si bien continúan incrementando la resistencia de la mezcla, no producen cambios en el límite plástico de la misma [Bell, 1996].

Reportes similares recientes afirman, en cambio, que la adición de al menos un 7% de cal en los suelos finos logra incrementar casi 5 veces la resistencia a la compresión no confinada del suelo estabilizado, logrando notables mejoras en los módulos de elasticidad en función del periodo de curado analizado [Ghobadi et al., 2013].

2.3.2.3 Problemática ambiental de la estabilización con cemento y cal

Si bien la adición de cemento Portland mejora las características mecánicas y durabilidad del suelo estabilizado, existen diversos aspectos negativos de esta técnica que merecen ser considerados. Entre ellos, los más significativos se encuentran relacionados con los impactos ambientales asociados a la producción del cemento Portland junto con el elevado consumo de energía necesario para su producción que conllevan a un aumento del consumo de combustibles fósiles [Kianfar y Toufigh, 2016]. Además de estos impactos también se genera, durante la producción del mismo, alta emisión de gases de efecto invernadero causantes del calentamiento global [Pakand y Toufigh, 2017; Chenarboni et al., 2021]. Las problemáticas ambientales asociadas al consumo de cal se encuentran relacionadas, a su vez, con la necesidad de explotar recursos naturales para su obtención, a la vez que provoca contaminación del aire en las industrias productoras [Baldovino et al., 2021].

A pesar de que las dosis utilizadas de cemento Portland y cal en los procesos de estabilización de suelos son bajos (entre el 1 y el 8%) se considera que la cantidad total que se requiere de estos agentes resulta grande respecto a la masa total de suelo mejorado [Daraei et al., 2019]. El principal impacto relacionado a la producción de estos materiales se encuentra relacionado a las emisiones directas e indirectas del proceso,

que contribuyen a huella de carbono [Gessa-Parera y González-Exposito 2017; Foteinis et al., 2022]. Esta representa una base común sobre la cantidad de emisiones gaseosas que resultan relevantes para el cambio climático, asociadas con actividades de producción o consumo humano [Wiedmann y Minx, 2008]. Las emisiones provienen principalmente de la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas), con contribuciones importantes de la tala de bosques, prácticas agrícolas y otras actividades [Barceló et al., 2014].

La producción de cada material tiene asociado a su proceso la incorporación de emisiones de CO₂ a la atmósfera por cada kg de material producido [Hammond et al., 2008], como presenta la Figura 2-4 adaptada de Hammond et al., 2011. La industria del cemento Portland se encuentra entre las que generan mayores emisiones de CO₂. Casi el 5-7% de las emisiones globales de CO₂ son causadas por las plantas de cemento que emiten 0,9 kg de CO₂ a la atmosfera por cada kg de material producida [Hasanbeigi et al., 2010; Benhelal et al., 2013; Feiz et al., 2015]. Valores asociados a la producción de cal reflejan emisiones que varían entre 0,6 a 1,2 kg CO₂ por cada kilogramo de cal producida [Gutiérrez et al., 2012; Shan et al., 2016].

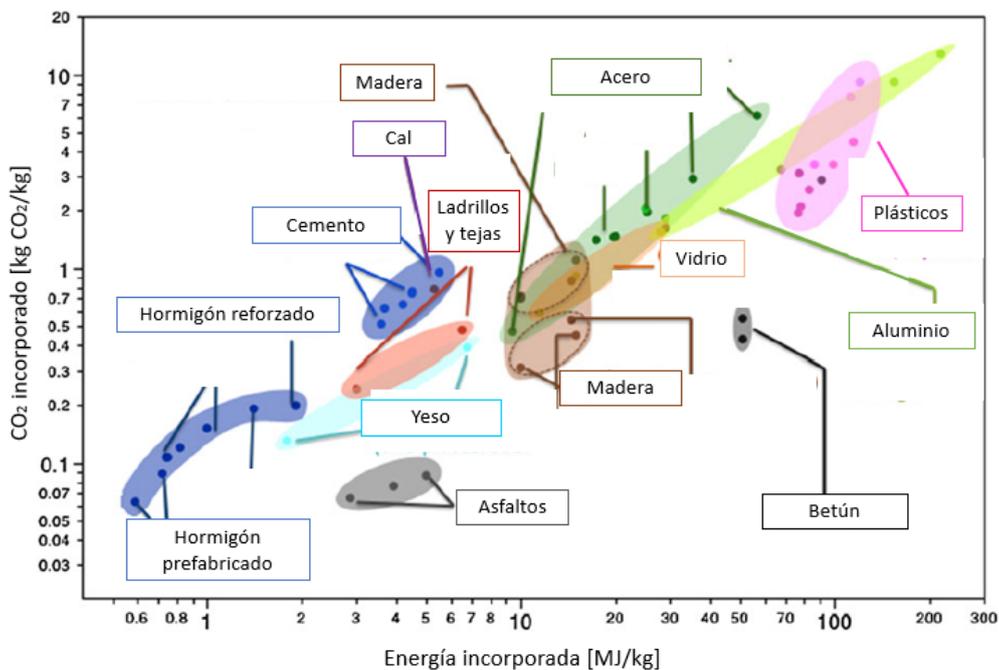


Figura 2-4 Energía y CO₂ incorporada para materiales típicamente utilizados en la industria de la construcción [extraído de Hammond et al., 2011].

Por ello en la actualidad los esfuerzos se encuentran orientados a lograr el reemplazo parcial o total, tanto del cemento Portland como de cal, en estos procesos de estabilización. En un intento por lograr esto, se ha comenzado a incursionar sobre las posibilidades de utilizar materiales de desecho sólidos en el tratamiento de suelos blandos y como mezcla de concreto, incluyendo en este proceso: cenizas volantes, cenizas de lodo, escoria de acero, ceniza de cáscara de bígara, relaves de mineral de hierro, polvo de cantera, metacaolín, ceniza de cáscara de arroz, etc. [Etim et al., 2021].

En el último periodo se ha fomentado la investigación sobre el comportamiento de subproductos industriales para su potencial uso como agentes estabilizadores. El principal objetivo busca minimizar el daño ambiental producido por la disposición de los mismos, reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero generados durante la producción de los agentes estabilizadores comunes minimizando el uso de recursos naturales y los costos de los materiales de construcción [MolaAbasi et al., 2019]. Una técnica reciente que tiende a la minimización del consumo de cal en los procesos de estabilización consiste en sustituir parte de la cal añadida por puzolanas de origen natural. A partir de estudios realizados se demostró que a medida que se incrementa el contenido de puzolana natural disminuye el índice de plasticidad, correlacionando dicha observación con el aumento de resistencia y reducción en el hinchamiento y compresibilidad [Al-Swaidani et al., 2016].

De esta problemática surge la necesidad imperiosa por parte de los investigadores de buscar alternativas que sean más respetuosas con el medio ambiente buscando suplantar el cemento por materiales puzolánicos que ejerzan la misma acción en el suelo, cementando las partículas de éste [da Luz García y Sousa-Courtinho, 2013; Jamsawang et al., 2017]. Estos materiales puzolánicos son materiales a base de SiO_2 y Al_2O_3 que reaccionan con el hidróxido de calcio (generado al hidratar el cemento) formando materiales cementantes adicionales que por sí solos no presentan función de cementante [Consoli et al., 2019; Consoli et al., 2021].

2.3.3 Estabilización mediante la adición de residuos

La tendencia actual mencionada previamente fomenta a que se investigue la posibilidad de generar la estabilización de suelos a partir de la mezcla de aditivos, como cemento y cal, con algún material de desecho buscando a la vez un enfoque sostenible para la gestión eficaz de los desechos generados en diversas industrias [Consoli et al., 2019; Consoli et al., 2021].

El proceso de estabilización de suelos radica, como se mencionó, en la formación de refuerzos que sean considerados insolubles. En este marco, las investigaciones involucran el estudio de materiales con diversos agregados, como por ejemplo la adición de caucho, cenizas volantes, escorias siderúrgicas o bien reutilización de materiales de construcción. El objetivo es lograr procesos tales como geopolimerización combinando el proceso de estabilización con cemento o cal o bien sustituyendo los mismos. El proceso entonces puede incluir la combinación de suelos con aditivos disponibles comercialmente, materiales de desecho y/o fibras naturales que alteren la gradación, textura o plasticidad de las mezclas o también actuar como aglutinantes para la cementación del suelo [Kumar y Kumar, 2020].

Diversos autores investigaron el potencial de aplicación de residuos de lechada de hormigón generada durante la producción de hormigón premezclado como material de cementación suplementario [Ghisellini et al., 2018; Keppert et al., 2021]. Como agente estabilizador de suelos la adición de residuos de hormigón forma hidratos, a partir de mecanismos de reacción, que cementan las mezclas manifestando incrementos en los parámetros resistentes con el tiempo [Reiterman et al., 2022].

Otras investigaciones indicaron que un 15% de adiciones de hormigón reciclado, derivado de procesos de demolición, en suelos arcillosos permite clasificar dicho material suficientemente bueno para ser utilizado como subcapa de pavimentos rígidos [Arulrajah et al., 2014], reduciendo las deformaciones y asentamientos de las mezclas a la vez que produce incrementos de resistencia a la compresión y al corte [Kianimehr et al., 2019].

Zhang [Zhang et al., 2020] estudió el comportamiento de suelos expansivos con adiciones de aglutinantes regenerados sostenibles, derivados de varios desechos sólidos industriales. Este estudio permitió detectar comportamientos mecánicos comparables a los que se obtienen al estabilizar un suelo con cemento. Los resultados obtenidos permitieron demostrar que existe una tasa de hidratación ligeramente más rápida en la etapa inicial que genera mejorías mecánicas a corto plazo.

Por otro lado, se ha realizado una amplia investigación acerca de la utilización de cenizas volantes para estabilizar suelos expansivos. Las cenizas volantes son un subproducto generado por las centrales térmicas a partir de la combustión de carbón pulverizado que pueden causar contaminación en el aire, agua superficial y/o subterránea representando un gran peligro ambiental. Estos subproductos presentan propiedades puzolánicas que ayudan a reducir el comportamiento de expansión en suelos finos aumentando la capacidad de carga en las mezclas [Kumar y Hakira, 2021]. En el mismo proceso existe intercambio de cationes que fomenta la ocurrencia del proceso de floculación en los suelos arcillosos debido a la presencia de óxidos de silicio, aluminio y hierro [Zhang et al., 2019]. Se observó, además, que las cenizas volantes reducen el área superficial del suelo y como consecuencia, la dependencia de agua, con lo cual se reduce el potencial y la presión de hinchamiento con la plasticidad [Karami et al., 2021]. La naturaleza puzolánica de las cenizas volantes genera que ocurran procesos de cementación en los materiales ayudando a que se reduzca incluso más el carácter expansivo de los suelos. La adición de estos productos puede incluso modificar la orientación de los poros del suelo mejorando significativamente su comportamiento de compactación. En general, al aumentar el porcentaje de cenizas volantes se obtiene una humedad de compactación menor a la vez que se incrementa la densidad seca máxima [Wang et al., 2019]. Este proceso favorece la estabilización del suelo, permitiendo que el material resultante sea utilizado como barrera hidráulica debido a que se logran obtener coeficientes de permeabilidad del orden de 10^{-5} cm/s [Singh y Panda 1996].

Estudios realizados revelaron que a mayor contenido de cenizas volantes es posible detectar disminuciones en los valores de resistencia alcanzados. Sin embargo, posteriormente se demostró que la incorporación de un agente activador de dicha

actividad puzolánica permite obtener mejoras significativas en las propiedades mecánicas del material estabilizado [Sivapullaiah et al., 1998]. Este material puede ser activado con soluciones altamente alcalinas como NaOH, KOH, etc., conocidas como álcali-activadores [Palomo et al., 1999]. Al utilizar cenizas álcali- activadas, se desarrollan incrementos en la resistencia y rigidez de las muestras con el incremento del periodo de curado durante el cual tienen lugar las reacciones puzolánicas que estabilizan los suelos [Prashanth et al., 2001].

Los ligantes álcali-activados requieren dos componentes principales, el precursor sólido rico en SiO₂ y Al₂O₃ (propiedades altamente puzolánicas) y el activador a base de un metal alcalino (generalmente Na o K). Debido al alto pH proporcionado por el activador, se produce una destrucción de los enlaces covalentes Si-O-Si, Al-O-Al y Al-O-Si presentes en el precursor. El Si y el Al son liberados y, al mismo tiempo, las especies de Na⁺, K⁺ o Ca²⁺ actúan como cationes intercapa equilibradores de carga, compensando las cargas negativas excesivas resultantes de la modificación del Al³⁺ [Myers et al., 2013]. Los productos de hidratación se acumulan y precipitan formando un gel identificado como aluminosilicato de sodio hidratado (N-A-S-H) [Fernández-Jiménez et al., 2017]. Si el calcio se encuentra presente en la mezcla, se forma un producto nanocristalino, conocido como silicato de calcio (± aluminio) de calcio hidratado, o simplemente C-A-S-H [Myers et al., 2015]

En el caso particular de suelos loésicos, se demostró que la adición de cenizas mejora el comportamiento del mismo frente a ciclos de congelamiento y deshielo, aumentando la durabilidad del suelo en comparación con el material sin agregados [Zhang et al., 2019]. Sin embargo, otros autores demostraron que la mejor estabilización se logra a partir de combinar materiales como cemento, residuos de fosfoyeso, cenizas volantes y cal viva [Zhang et al., 2019; Rai et al., 2021]. En este marco, la adición de fosfoyeso en porcentajes próximos al 5% promueve la generación de hidrogeles reaccionando con el cemento produciendo ettringita, siendo que, al añadir a la mezcla 20% de cenizas volantes se mejora la resistencia a partir del desarrollo de reacciones de tipo puzolánico que evolucionan con el tiempo [Gu y Chen, 2020].

En este sentido, en el mundo contemporáneo se generan cientos de toneladas de diversos desechos, vinculados a la mejora en la calidad de vida y al creciente desarrollo industrial [Abdel-Shafy y Mansour, 2018]. La eliminación de estos desechos sólidos resulta un problema generalizado en diversas áreas de países desarrollados y en vías de desarrollo. Es por este motivo que se considera que si estos residuos no se reciclan de manera inmediata su eliminación se convertirá en una tarea sumamente desafiante debido a la limitación en la disponibilidad de áreas de disposición final [Rai et al., 2020]. El desafío consiste entonces en reutilizar los desechos de la mejor manera posible. Por este motivo, se han fomentado en las últimas décadas aquellas investigaciones sobre las propiedades de los residuos determinando su viabilidad para ser utilizados como materiales estabilizadores.

2.4 ESCORIAS SIDERÚRGICAS

El término escoria es un término amplio que abarca todos los subproductos no metálicos resultantes de la separación de un metal de su mineral. Dentro de este ámbito, se encuentran las escorias siderúrgicas: un subproducto generado por la purificación, fundición y aleación de metales.

Los minerales metálicos, como el hierro, cobre, plomo o aluminio, se encuentran en la naturaleza en estado impuro, oxidados y/o mezclados con silicatos metálicos. Durante el proceso de fusión del mineral, cuando el mismo se expone a elevadas temperaturas, las impurezas se separan del material fundido pudiendo eliminarlas, proceso a partir del cual se forman estos compuestos denominados como escorias. Una vez purificado el metal en cuestión, se prosigue con el procesamiento posterior que consiste en llevar a cabo procesos de fundición y aleación, agregando sustancias en el medio para fundirlo y enriquecerlo reformando la escoria como subproducto. De esta manera, las escorias se componen, principalmente, por impurezas de minerales (principalmente silicio y aluminio), combinadas con calcio y magnesio [Grubeša et al., 2016]. Este subproducto perteneciente a la industria de la acería es un remanente que se clasifica como residuo al no ser reutilizado y finalmente disponerse como desecho.

2.4.1 Clasificación de los residuos siderúrgicos

La Sociedad Estadounidense para Pruebas de Materiales (American Society for Testing Materials, ASTM) definió la escoria de alto horno como un *“producto no metálico que consiste esencialmente en silicatos y alúmino-silicatos de calcio y otras bases que desarrolla en estado fundido simultáneamente con hierro en un alto horno”* [ASTM, 2022]. Su composición química depende de la composición del mineral de hierro, del combustible utilizado y del material fundente añadido, junto con las proporciones requeridas de los mismos para lograr una operación eficiente del horno en el cual se trabaja [Grubeša et al., 2016].

La escoria de acería puede clasificarse en función del proceso de producción utilizado para la obtención del acero como producto final; en este marco, existen tres procedimientos diferentes que se utilizan, lo cual permite clasificar a las escorias resultantes de la producción en función del tipo de horno utilizado. A partir de identificar el procedimiento aplicado se pueden clasificar estos subproductos (escorias) como se indica en la Figura 2-5.

Los procedimientos comunes utilizados implican el uso de hornos eléctricos o de oxígeno básico (Figura 2-5). Las diferencias radican, además del funcionamiento del horno en sí, de la proporción de chatarra (acero viejo) reutilizado en la fabricación de acero nuevo.

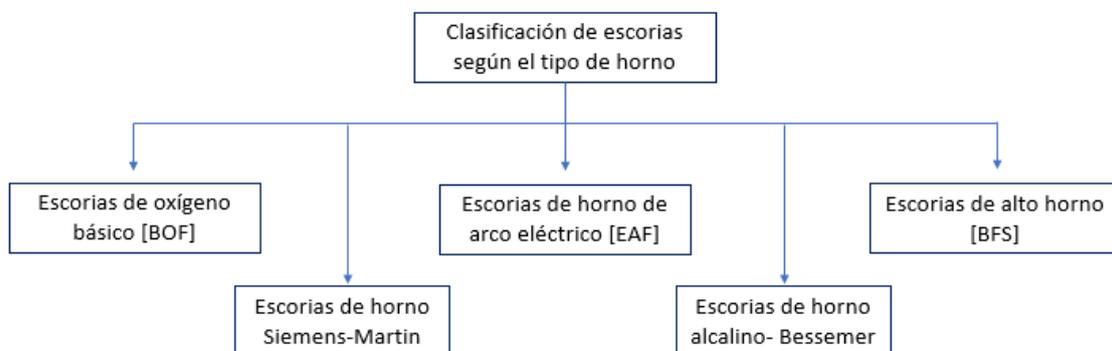


Figura 2-5 Escoria de acería, producida en función del proceso de fabricación del acero [adaptado de Chadwick 1988; Grubeša et al., 2016; Gencel et al., 2021].

En el primer caso, la fabricación del acero a partir del mineral de hierro, utiliza carbón vegetal como agente reductor en los altos hornos. El proceso de refinado, llevado a cabo en el horno de oxígeno básico (BOF), combina combustible sólido denominado coque, producido a partir del carbón, con carbón pulverizado. Estos materiales, a partir de un proceso de explosión a altas temperaturas, forman hidrógeno y monóxido de carbono que actúan como agentes reductores básicos de los óxidos de hierro. En general, los hornos suelen cargarse por la parte superior añadiendo capas alternadas de los agentes reductores combinados con material de fusión; una vez mezclados, se inyecta oxígeno a presión estimulando que ocurran reacciones químicas responsables de separar las impurezas presentes en el acero. Una vez floculadas las impurezas se separan enfriándose dando lugar a la formación de escorias siderúrgicas (SS) [Seetharaman, 2005]. En este sentido en el horno de oxígeno básico se utiliza principalmente arrabio (hierro), junto con una menor proporción de chatarra de acero, consumiendo grandes cantidades de oxígeno para oxidar la carga [Martins et al., 2021]. La proporción de chatarra de acero consumida en el proceso oscila entre el 25% y 35% del material total consumido.

Las escorias de horno de arco eléctrico (EAF) utilizan una corriente eléctrica para producir el calor necesario y fundir la chatarra de acero reciclada, por lo que requieren menores cantidades de hierro fundido de alto horno [Brandt y Warner, 2009]. En este caso, a diferencia de la generación de BOF, el proceso utiliza prácticamente un 100% de chatarra de acero viejo para fabricar acero nuevo.

Estas escorias de hierro fundido durante el proceso se solidifican a distintas temperaturas y condiciones definiendo, en función de ello, las características de las mismas. Las distintas propiedades de la escoria constituyen condicionantes de sus posibles usos comerciales, tales como agregado en la construcción o como agentes estabilizantes [Van Oss, 2013].

Diversos autores reportan que los desechos de escoria formados en el proceso de fabricación del acero se producen a una tasa de 150/200 kg por tonelada de conversión del producto obtenido de la primera fusión del hierro en los altos hornos, conocido

como arrabio, en acero [Van Oss, 2013; Chand et al., 2016; Chang et al., 2021]. La principal problemática ligada a estas cantidades generadas se encuentra vinculada al aumento de toneladas de producción de acero por año. Al incrementar el consumo/producción de acero, aumenta conjuntamente la cantidad de escorias derivadas de dicho proceso.

Sin embargo, del total de escoria obtenido en el proceso solo una cantidad aproximada y menor al 30% de la misma vuelve a consumirse dentro del proceso productivo. La mayor parte de la escoria de acero se abandona al azar, lo cual genera la acumulación de estos agregados representando no solo un desperdicio de recursos sino también una potencial amenaza como fuente de contaminación para el medio ambiente [Yi et al., 2012; Wang et al., 2013; Zhao et al., 2017].

En diversos países del mundo las regulaciones ambientales exigen, al día de la fecha, minimizar o eliminar los desechos industriales. Por este motivo se comenzó a investigar la posibilidad de reutilización de estos subproductos con el objetivo de lograr un desarrollo sostenible [Piatak et al., 2015; Yüksel, 2017], buscando una mejora en la calidad de vida permitiendo que las personas vivan en un medio saludable mejorando las condiciones sociales, económicas y ambientales de las generaciones presentes y futuras.

2.4.2 Características y aplicaciones de las escorias

Las partículas de escoria siderúrgica están compuestas principalmente por óxidos de silicio (SiO_2), calcio (CaO), hierro (FeO), aluminio (Al_2O_3), magnesio (MgO), manganeso (MnO) y fósforo (P_2O_5). La Tabla 2-2 presenta información acerca de la composición química de las escorias aportados por diversos autores en los últimos 20 años adaptada de la recopilación realizada por Gençel y colaboradores, y Song y colaboradores [Gençel et al., 2021 y Song et al., 2021]. La variación en la composición química que puede ser identificada en la tabla, se encuentra relacionada a la tipología de producción de acero identificado.

Tabla 2-2 Composición química de las SS [extraído y adaptado de Gençel et al., 2021; Song et al., 2021].

Autores	Componente (%)						
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	FeO - Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅
Lim et al., 2019	29,99	17,31	4,67	5,39	5,03	27,33	1,08
Sabapathy et al., 2017	20–40	6–23	3–14	3–15	1,5–15	20,40	–
Shi, 2004	35–60	9–20	2–9	5–15	3–8	15–30	0,01–0,25
Adegoloye et al., 2016	41,73	34,73	6,26	9,06	2,15	0,54	-
Lang et al., 2019	41,05	9,45	0,75	10,11	2,2	6,34	2,11
Alizadeh et al., 2003	40–52	10–19	1–3	5–10	5–8	15–30	0,5–1
Qasrawi, 2018	29,7	15,5	4,7	6,6	2,9	37,0	0,4
Sofilic et al., 2010	33,2	10,08	1,66	13,09	6,18	29,64	–
Ahmedzade y Sengoz, 2009	51	12,5	1,4	1,3	3,7	23,5	–
Anastasiou et al., 2014	20,6	22,8	8,46	3,63	–	32,6	–
Brand y Roesler, 2015	35–60	9–20	2–9	5–15	2–8	20–30	0,01–0,25
Pang et al., 2015	46,73	14,77	5,52	6,27	2,76	18,42	1,67
Saxena y Tembhurkar, 2018	51,43	15,62	18,89	3,89	0,45	3,75	1,42
Dash et al., 2016	0,40–52	0,8–35	1–16	0,4–11	1,07–8	0,5–10	0,5–1
Guo et al., 2019	41–43	14–15	4–5	6–7	–	21–23	–
Kehagia, 2009	33,24	14,43	5,39	1,70	6,37	35,68	0,40
Kouronis et al., 2007	35,7	17,53	6,25	6,45	2,5	2,36	–
Liu y Guo, 2018	43,37	19,11	7,46	5,17	2,66	18,11	1,76
Abu-Eishah et al., 2012	39,62	17,23	4,08	9,23	0,70	20,40	–
Liu et al., 2020	44,83	14,38	5,48	3,42	1,94	21,65	0,83
Mohamad et al., 2020	45,18	18,48	3,76	4,83	3,61	19,45	2,11
He et al., 2012	50,56	21,36	4,62	8,86	–	3,16	1,32
Phan et al., 2018	47-55	7,5–15	1,2–1,7	1,3–1,5	3,5–5,3	20–26	–
Yuji, 1987	42	16	1,5	5,61	–	7,78–17,6	1,99
Xue et al., 2006	45,41	13,71	3,8	6,25	3,27	21,85	1,42
Tran et al., 2015	28,9	16,3	6,07	1,68	4,02	39,2	0,36
Arribas et al., 2015	32,52	17,17	7,96	4,56	3,80	30,80	0,58
Mo et al., 2017	42,42	11,04	1,61	7,19	2,28	27,37	2,09
Zhang y Chang, 2020	47,21	15,61	4,24	6,24	1,85	19,26	-
Lin et al., 2020	41,35	20,68	0,95	4,83	3,77	17,23	10
Bocci et al., 2018	50,36	21,64	9,36	13,06	0,32	1,47	0,03

La naturaleza de las escorias depende, como se mencionó, de las materias primas utilizadas en su proceso de fabricación, siendo esperable que la misma varíe en función de la industria de fabricación y con el tiempo. La reutilización de las mismas presenta un escenario en el cual no solo se logra reducir el costo de procesamiento de agregados

convencionales, sino que también permite minimizar el tiempo, costo y espacio al cual se incurre con el almacenamiento de las mismas [Logeshwari y Sivapullaiah, 2021].

Los parámetros físicos, mecánicos, químicos y morfológicos de las escorias indican que es un material apto para ser utilizado en diversas aplicaciones, relacionado a la granulometría que presentan las mismas que se encuentra condicionada por la planta de trituración que presente la industria, presentando morfologías de áridos irregulares, con superficies rugosas y cantos vivos [Logeshwari y Sivapullaiah, 2021].

Debido a las características que presentan las escorias siderúrgicas, las mismas han sido utilizadas en distintos ámbitos alrededor del mundo [Guo et al., 2018]. Europa, por ejemplo, en la década del 80 comenzó a usar escoria de acero para fertilizantes de fosfato [Geiseler, 1996]. Debido a su composición química, que incluye óxido de calcio (CaO), hierro (Fe), óxido de hierro (FeO), dióxido de silicio (SiO₂), óxido de magnesio (MgO) y óxido de manganeso (MnO), estas partículas pueden ser también reutilizadas como materia prima en plantas siderúrgicas [Topkaya et al., 2004; Diao et al., 2016; Sarfo et al., 2017a; Sarfo et al., 2017b].

Producto de su estructura porosa y de sus propiedades alcalinas, la escoria de acería puede ser utilizada para el tratamiento de aguas residuales [Ortiz et al., 2001; Yildirim y Prezzi, 2011; Ponsot y Bernardo, 2013]. Algunos investigadores han afirmado que la escoria de acero se puede utilizar con éxito como agregado para la construcción de obras viales debido a sus propiedades físicas y mecánicas favorables, que incluyen dureza, resistencia al desgaste, adhesividad, rugosidad y tenacidad [Shen et al., 2009; Pasetto et al., 2017; Ferreira et al., 2016]. La presencia de silicato de calcio, silicato tricálcico, aluminoferrita tetracálcica y otros componentes minerales confiere a la escoria de acero propiedades cementantes con potencial uso para la producción de cemento [Tsakiridis et al., 2008; Kourounis et al., 2007; Gonçalves et al., 2016]. Además, debido a que contiene CaO y MgO, la escoria de acero se puede reutilizar para capturar y almacenar dióxido de carbono (CO₂) [Santos et al., 2012; Pan et al., 2016; Bodor et al., 2016; Zhang et al., 2017, Tong et al., 2018]. Debido a que en su composición química incluye

elementos tales como Si, Ca, Mg, P y Fe, la escoria siderúrgica también puede ser reutilizada como fertilizante y para la mejora del suelo [Gómez-Nubla et al., 2017].

Diversos autores han estudiado la posibilidad de utilizar las escorias como aglomerante alternativo, a partir del fenómeno de carbonatación de la portlandita y el silicato de calcio [Nielsen et al., 2020; Song et al., 2021]. Estos estudios revelaron que la reactividad de la carbonatación se encuentra relacionada a la composición química, siendo que cuanto mayor sea el contenido de CaO, mayor CO₂ puede ser absorbido traduciéndose por tanto en mejoras en la resistencia a la compresión simple de muestras de cemento y hormigones [Mo y Panesar, 2012; Devi y Gnanavel, 2014; Pang et al., 2015; Wang et al., 2019]. Además, se detectó que el grado de carbonatación de la escoria puede incrementarse a partir de la molienda adicional de las mismas [Liu y Li, 2014].

Si bien algunos tipos de escorias resultan similares al cemento Portland en cuanto a composición química, las mismas presentan una actividad de hidratación más alta, debido a que la escoria de acero contiene menos silicato tricálcico y tiene un mayor contenido de solución sólida de compuestos de hierro [Fisher y Barron, 2019]. Sin embargo, estas partículas demostraron presentar beneficios a partir de su uso como material de encalado a partir de elevar el pH de suelos ácidos mejorando las propiedades físicas de suelos blandos [Fisher y Barron, 2019].

La utilización de las escorias para diversas aplicaciones antes mencionadas reduce el área y costo necesario para su almacenamiento, resultando de esta forma no solo soluciones económicas si no también amigables con el ambiente [Logeshwari y Sivapullaiah, 2021].

2.4.3 Usos y aplicaciones de las escorias como estabilizantes

En las últimas décadas diversos investigadores comenzaron a investigar la posibilidad de sustituir parcialmente los aglutinantes comunes (cemento y cal) con escorias. Se demostró que las inclusiones de residuos no generan modificaciones adversas que desfavorezcan el proceso de estabilización propuesto logrando obtener, en todos los casos, mejoras en las resistencias a la compresión no confinada en comparación con los

resultados obtenidos para el suelo no estabilizado [Liu et al., 2019]. En las últimas décadas se ha incorporado en proyectos de ingeniería el concepto de sostenibilidad. En este marco, las escorias siderúrgicas emergen como una posible solución para lograr estabilizar distintos tipos de suelos buscando minimizar el consumo de recursos naturales, a la vez de reutilizar materiales que son considerados, de otra forma, como un desecho. Si bien estudios anteriores han demostrado que la escoria de acero se puede utilizar como aglutinante alternativo en la producción de diversos materiales de construcción y productos civiles, en la actualidad el estudio acerca del desempeño de suelos estabilizados con escoria resulta escaso [Cikmit et al., 2019; Yu et al., 2021].

La necesidad de estabilizar suelos blandos se encuentra relacionada con la baja resistencia al corte y alta compresibilidad que presentan estos materiales, lo cual requiere de la adopción de diversos métodos para lograr mejorar algunas propiedades del suelo [Saberian et al., 2020; Miraki et al., 2022]. De acuerdo a diversos autores las escorias han sido utilizadas tradicionalmente en suelos arcillosos para proporcionar estabilidad a largo plazo en los sistemas de cimentación, debido a que la mezcla de suelo-escoria reduce la plasticidad, el colapso y el potencial de expansión resultando en estándares equivalentes a las mezclas de suelo-cal [Manso et al., 2013; Ortega-López et al., 2014; Shalabi et al., 2017]. Cuando aumenta el contenido de residuos en la mezcla, aumenta la generación de productos de reacción, siendo la capacidad de cementación del gel la que permite que los materiales de tierra estabilizados con escorias tengan mayor resistencia a la compresión, resistencia al agua y durabilidad. Además, se observó que los productos de hidratación, hidrogeles, reducen la porosidad de las probetas y permiten que el material de tierra estabilizado con escorias tenga menor resistencia térmica [Liu et al., 2014; Liu et al., 2018; Liu et al., 2019].

Otros trabajos de investigación detectaron que a partir de la adición de partículas de escoria ultrafinas en estratos de arcillas marinas se logra reducir el agrietamiento del mismo. A medida que aumenta la proporción de escorias hasta un 40%, se logra reducir el factor de intensidad de fisuración y de contracción de este suelo blando. Con estos estudios se detectó que la escoria ultrafina puede ser una potencial mezcla sostenible para la estabilización de taludes marinos, áreas de arroyos y para la estabilización de

material dragado [Wanare et al., 2022]. La presencia de escorias en arcillas marinas demostró generar, a su vez, incrementos en la resistencia de las muestras estabilizadas, detectando correlaciones entre el incremento de resistencia y la granulometría de las escorias utilizadas. A medida que las escorias presentan granulometría más fina la resistencia alcanzada se incrementa [Cikmit et al., 2019].

Por otro lado, se estudió que el uso conjunto de cenizas volantes con escorias forma un aglutinante que brinda nuevas oportunidades para mejorar las actividades puzolánicas pudiendo reducir el potencial de hinchamiento y aumentar la resistencia a la compresión no confinada de las arcillas expansivas. Estudios revelaron que la adición de este aglutinante reduce a la vez, el límite líquido e índice de plasticidad aumentando el límite de contracción de las arcillas, disminuyendo en manera conjunta el contenido de humedad óptimo mientras la densidad seca máxima se incrementa. De manera conjunta, se demostró que la resistencia a la compresión no confinada del suelo aumenta con el aumento del contenido de aglutinante, así como con un período de curado más largo [Sharma y Sivapullaiah, 2016]. La combinación de cenizas volcánicas con escorias siderúrgicas provee a las mezclas cantidades suficientes de silicio, calcio y aluminio, lo cual conlleva a la formación de hidrogeles que tienden a rellenar los espacios vacíos en la red de materiales 3D dando como resultado una matriz más densa y fuerte que se traduce en aumentos de resistencia [Miraki et al., 2022].

La presencia de compuestos activos carbonatados como el silicato di y tricálcico [O'Connor et al., 2021], son responsables del desarrollo de procesos de estabilización carbonatada, tales como la formación de grupos fusiformes de calcita [Yu et al., 2021]. La adición de ligantes de escoria álcali activadas en suelos arcillosos demostraron que la principal fase de unión formada es aluminosilicato de calcio, producto de la hidratación que ocurre en las mezclas, similar a la fase que se forma en el hormigón. A partir de este proceso se observó que se reduce la compresibilidad del suelo, siendo que el material mostró respuestas triaxiales similares a las mezclas cemento-arcilla aumentando siempre la resistencia máxima alcanzada [Corrêa-Silva et al., 2020].

2.5 LIMOS LOÉSSICOS

2.5.1 Origen y génesis

Dentro del grupo de los suelos finos de origen natural podemos encontrar los limos loéssicos. Estos suelos presentes en gran parte del territorio Nacional son depósitos de origen eólico que consiste principalmente en cuarzo, feldespato y mica junto con granos de carbonato y minerales de arcillas [Pye, 1984]. Estos depósitos formados durante el periodo cuaternario dentro de regiones áridas o semiáridas se caracterizan por depositarse de manera suelta presentando colores principalmente pardos con partículas del tamaño de los limos y presencia de abundantes macroporos [Rinaldi et al., 2007]

Dependiendo del mecanismo que da lugar a la formación del depósito, se puede clasificar el sedimento como loess primario o loess secundario. El primero de ellos se encuentra ligado fundamentalmente a procesos eólicos mientras que el loess secundario se corresponde a un depósito modificado por diversos procesos diagenéticos que transforman su granulometría y mineralogía [Rinaldi et al., 2012]. De esta manera podemos diferenciar las características de las formaciones de acuerdo al área de origen y a su mecanismo de transporte [Li et al., 2020], siendo que los depósitos de esta tipología de suelo involucran distintas etapas como producción, deflación, transporte y deposición de partículas en determinados ambientes [Muhs, 2013a; Muhs, 2013b].

El término loess surge a partir del término original “Löss”, introducido en la geología a partir de estudios realizados sobre formaciones de la cuenca Rin ubicada en Alemania; el mismo se encuentra relacionado con el vocablo “Lösch” que se traduce como ligero o poco compacto. Es debido a esta disposición suelta que adoptan las partículas depositadas por el viento, que estos sedimentos presentan problemas de inestabilidad mecánica o colapso relacionados con ciertas combinaciones de humedad y carga, pudiendo además presentar problemas de filtración y erosión [Zhou et al., 2014; Qi et al., 2018; Sadeghi et al., 2019]. El colapso implica una disminución en el volumen, donde las partículas se reorganizan en una estructura más compacta, ordenada y estable [Assadi-Langroudi et al., 2018]. Por lo tanto, este fenómeno de colapso se encuentra

relacionado, según diversos estudios, a su condición original como depósitos continentales que se encuentran en estado suelto y con elevada cantidad de vacíos [Gibbs y Holland, 1960].

2.5.2 Estrato geológico natural de loess en Argentina

De acuerdo a información reportada por diversos autores, los suelos loésicos se distribuyen cubriendo en manera aproximada el 10% de la superficie terrestre, como puede apreciarse en la Figura 2-6 [Li et al., 2020], extendiéndose en gran parte sobre América del Norte, Europa, Asia y América del Sur. El mapa presentado esquematiza las áreas donde predomina este depósito eólico junto con el origen y las rutas de transporte de las formaciones más abundantes a nivel mundial. A partir de esta figura es posible observar dos fuentes de formación de loess, de procedencia glaciar con transporte fluvial en caso de provenir de capas de deshielo continental, o bien de procedencia montañosa con transporte fluvial en caso de que la principal fuente de depósito sean montañas con grandes altitudes, como es el caso de la cordillera de los Andes en Argentina.

En Argentina, los suelos loésicos cubren aproximadamente un área equivalente al 35% de la superficie, distribuyéndose sobre la zona céntrica del país principalmente como lo muestra la Figura 2-7, en manera tal que constituye el principal suelo regional en la provincia de Córdoba. Su composición mineralógica se distingue del resto de los depósitos mundiales debido a la presencia de minerales volcánicos y a su condición de alcalinidad [Moll et al., 1988; Zárate, 2003; Francisca, 2010]. Dicha presencia de minerales y partículas volcánicas está relacionada a las erupciones volcánicas andinas, provenientes de los volcanes ubicados en la región de la Puna Argentina, constituyendo la principal fuente de loess en la región [Zárate, 2007]. Si bien la composición mineralógica varía dependiendo de la región en la cual se encuentren, en general se caracterizan por la abundancia de plagioclasas, cuarzo y un porcentaje generalmente alto de vidrio volcánico [Zárate, 2007]. La composición química presenta un contenido superior al 50% de SiO_2 , con pequeñas cantidades de Al_2O_3 y Fe_2O_3 [Gu y Chen, 2020].

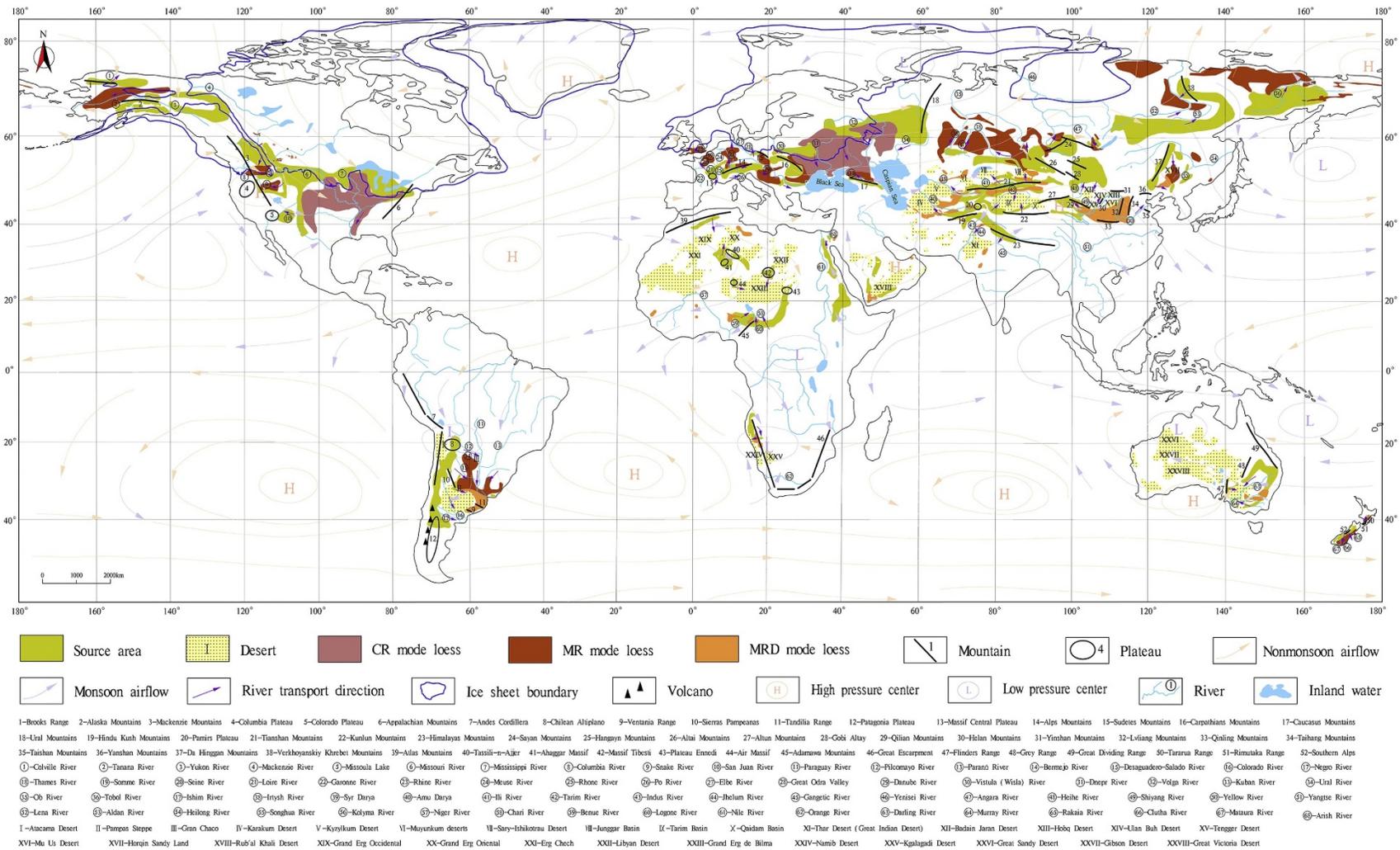


Figura 2-6 Distribución mundial de sedimentos eólicos [extraído de Li et al., 2020].

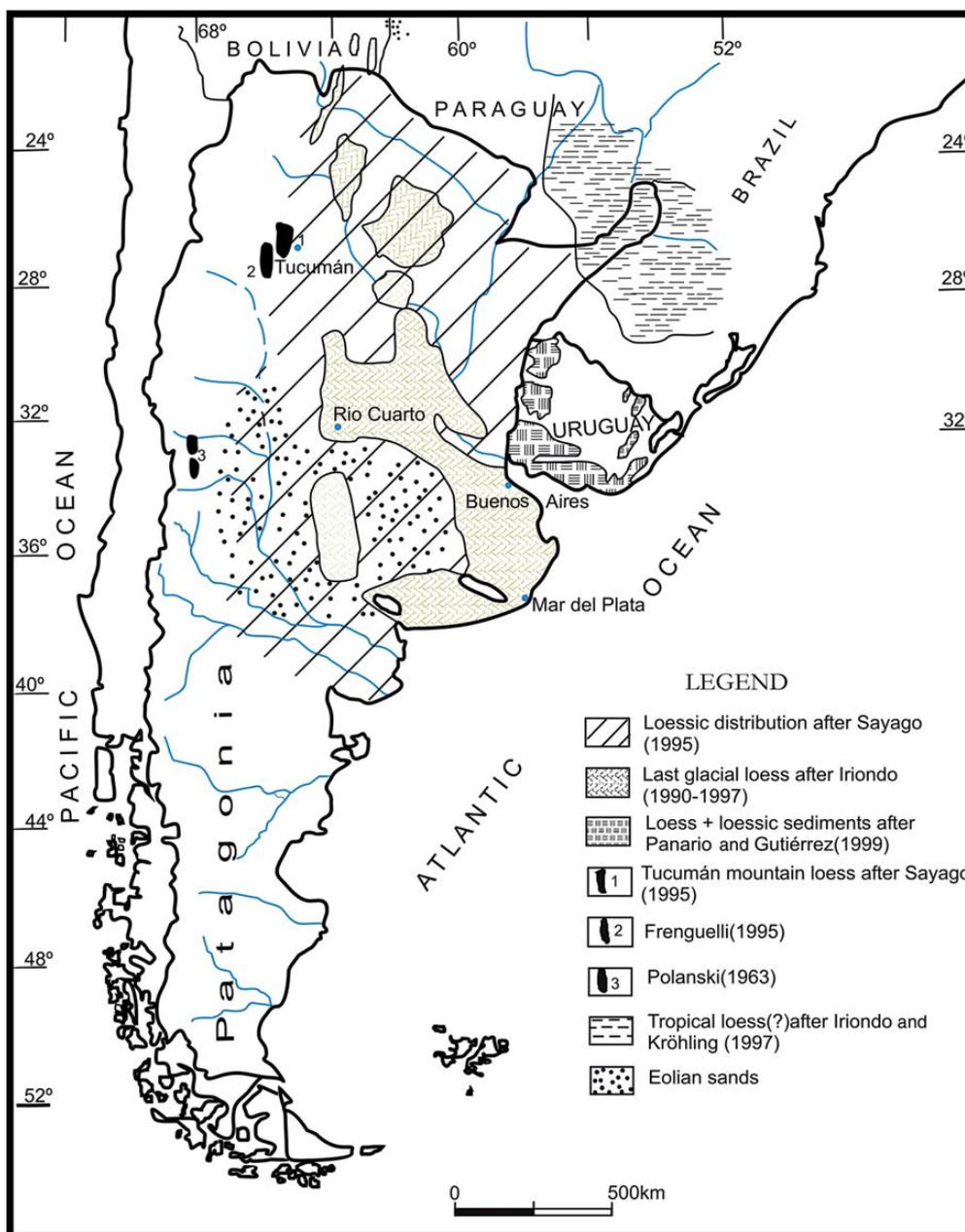


Figura 2-7 Distribución de suelo loésico en Argentina [extraído de Zárate, 2007].

Dentro del arreglo estructural, el limo loésico puede mantener partículas cementadas a través de ligantes débiles, aportados por sales solubles presentes en los poros del suelo, fragmentos de sílice amorfa que posee características cementantes, carbonatos de calcio y óxidos de hierro.

La inestabilidad del estrato en sí se encuentra ligada al hecho que, ante la presencia de agua, estos cementantes precipitados se disuelven disminuyendo por ende la resistencia

al corte entre las partículas de limo provocando que la estructura colapse [Reginatto, 1970; Rinaldi et al., 2007; Capdevila, 2008]. Es decir, la resistencia y estabilidad de la masa de suelo depende de la resistencia de estas uniones y contactos entre partículas con lo cual la alteración de los mismos debido al incremento de carga, contaminación de la masa de suelo o cambios en la humedad de la misma afecta significativamente su comportamiento [Reginatto y Ferrero, 1973; Francisca y Arrúa, 2007; Francisca, 2010].

En este sentido, los sedimentos loésicos locales se caracterizan principalmente por su estructura altamente colapsable; su principal característica geotécnica está constituida por su estado metaestable, lo cual genera el colapso de la estructura macroporosa debido a cambios de humedad, cambios en el grado de saturación, tensiones medias actuantes, presiones de poros o tensiones de corte dependiendo del caso [Jefferson et al., 2005; Terzariol, 2010, Feng et al., 2015].

2.5.3 Estabilización de limo loésico

Con el objetivo de resolver o prevenir los problemas causados por el loess colapsable, diversos investigadores han estudiado e implementado una variedad de técnicas con el objetivo de mejorar las propiedades del estrato, considerando la necesidad de satisfacer los requerimientos ingenieriles para ser utilizado como material de construcción.

El tratamiento del loess con cemento o cal ha sido ampliamente aplicado [Jefferson et al., 2008; Li et al., 2011; Metelková et al., 2012; Arrua et al., 2012]. El fraguado y endurecimiento del cemento junto con los cambios físicos y químicos complejos que ocurren producto de la adición del mismo permiten mejorar efectivamente los parámetros de resistencia al corte del loess. Estos estudios demostraron que no solo logra eliminarse el riesgo de colapso, sino que además se reduce el asentamiento, manteniendo su rendimiento desde el momento de la estabilización. Se demostró que agregar cemento puede mejorar el índice de resistencia al corte del suelo, porque el cemento reduce el contenido de macroporos, de modo que toda la estructura es más estable [Liu et al., 2014].

A partir de la adición de cal en suelos loésicos se detectó que existe una tendencia a generar reducciones en la plasticidad de las mezclas, mejorando la trabajabilidad, aumentando la resistencia y rigidez del suelo tratado, siendo las propiedades resultantes de la mezcla dependientes, por un lado, de la calidad de la cal añadida, y, por otro lado, de la composición química y mineralógica del suelo [Boardman et al., 2001; Matelková et al., 2012]. En el caso de suelos loésicos, la adición de cal altera las propiedades fisicoquímicas debido a la hidratación inducida por la migración de iones y reacciones puzolánicas que causan la floculación de las partículas, dando como resultado la formación de agregados [Pei et al., 2015].

En las últimas dos décadas se han desarrollado investigaciones tendientes a sustituir cal o cemento por cenizas volantes o geopolímeros. A partir de la adición de cenizas volantes y cemento en limos loésicos se logra mejorar la durabilidad frente a ciclos de congelamiento y deshielo logrando eliminar la acción capilar que favorece la infiltración de agua en el suelo [Zhang et al., 2019].

Por otro lado, Gu y Chen [Gu y Chen, 2020] demostraron que la adición de 2 a 5% de fosfoyeso en mezclas con suelo-cal promueve la generación de hidrogeles reaccionando con el cemento para producir ettringita, siendo que la incorporación de 20% de cenizas volantes en la misma mezcla logra mejoras en la resistencia a compresión simple a partir del desarrollo de reacciones puzolánicas. A partir de análisis de SEM, estos autores observaron que los geles de ettringita junto con los hidrogeles generados (CSH) reaccionan con el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) de la cal viva generando una estructura cementada que le proporciona la resistencia a la muestra.

Mariri y colaboradores investigaron la posibilidad de sustituir parcialmente el cemento con materiales puzolánicos como la zeolita, reforzados con fibras de poliéster reciclado. Estos estudios demostraron que, al agregar cemento al loess, la resistencia a la compresión no confinada (UCS) del suelo aumenta significativamente mientras la deformación correspondiente disminuye en comparación con los resultados obtenidos para el suelo puro (no estabilizado), siendo más significativo el aumento de resistencia con el periodo de curado [Mariri et al., 2019].

Otras investigaciones se han centrado sobre la utilización de geopolímeros para estabilizar suelos. El geopolímero es un material inorgánico formado por la activación alcalina de material que contiene alúmina y sílice a través de un proceso de policondensación en el que la sílice tetraédrica (SiO_2) y la alúmina (AlO_4) se unen entre sí al compartir los átomos de oxígeno. Los geopolímeros con alta resistencia a la compresión, baja contracción, buena resistencia a los ácidos y buena resistencia al fuego, podrían sintetizarse a partir de una variedad de materiales de bajo costo o desechos industriales, como metacaolín, cenizas volantes, cenizas de cáscara de arroz y escoria de horno [Zhang et al., 2013; Deb et al., 2014]. Trabajos realizados sobre la composición y microestructura del aglutinante de cenizas volantes álcali-activadas descubrieron que es posible desarrollar una fuerte adherencia entre los agregados sólidos y la matriz de gel de aluminosilicatos, lo cual se traduce a incrementos en la resistencia de las mezclas. Estas características hacen que los geopolímeros se consideren prometedores en aplicaciones de ingeniería civil, incluida la estabilización de suelos [Palomo et al., 1999]. Además, a partir de pruebas mecánicas, caracterización de la microestructura y análisis mineralógico se demostró que se desarrolla en el medio una microestructura compacta y estable en el loess estabilizado producto de la adición y síntesis de geopolímero [Liu et al., 2016].

El desprendimiento y el colapso del loess inducido por ciclos de humedecimiento y secado son fenómenos que ocurren con frecuencia. Para contrarrestar este comportamiento, Xu y colaboradores propusieron adicionar fibras sintéticas de basalto (fibras inorgánicas ecológicas de alto rendimiento compuestas principalmente de óxidos). Estos autores demostraron que un 0,6% de adición de fibras permite resistir el efecto del deterioro de los ciclos de humedecimiento y secado, y mejorar las características plásticas del material inhibiendo al mismo tiempo el desarrollo de grietas en la superficie del loess [Xu et al., 2022].

En todos los casos, se logró demostrar que la adición de aglutinantes a suelos de grano fino como el loess, logra aumentar significativamente las propiedades mecánicas y de ingeniería [Bell, 1996]. Agregando cemento, nanoarcillas, cenizas volantes y/o polímeros se logra producir cambios en la plasticidad del loess, mejorar la compresibilidad,

augmentar el contenido de humedad óptimo, mejorar la capacidad de carga del suelo estabilizado y la resistencia al corte [Zhang et al., 2017; Tabarsa et al., 2018; Kong et al., 2018; Phoak et al., 2019; Ma y Ma 2019].

2.5.4 Loess como material de construcción de barreras

Uno de los posibles usos ingenieriles de los suelos loésicos consiste en la utilización de este estrato geológico como material de construcción para barreras en rellenos sanitarios. Estas barreras se utilizan, ya sea para reducir el movimiento de aguas subterráneas contaminadas, o bien, para minimizar el movimiento de aguas subterráneas no contaminadas a través de sitios contaminados [Mulligan et al., 2001; Sharma y Reddy, 2004]. Los principales requisitos de los revestimientos están relacionados con garantizar la minimización de la migración de contaminantes a largo plazo, bajo hinchamiento y contracción, y resistencia al cizallamiento o corte [Hamdi y Srasra, 2013]. En este marco, los suelos compactados son comúnmente utilizados como materiales de revestimiento en barreras para aislar los materiales de desecho peligrosos del entorno circundante [Chalermyanont et al., 2009].

Un sistema de barrera se compone por distintas capas las cuales pueden construirse tanto con materiales granulares naturales y/o suelos locales o bien implementar el uso de geosintéticos que permitan cumplir la normativa que refiere a valores de conductividad hidráulica, evitando de esta forma la contaminación o la migración de los contaminantes hacia el medio [Touze-Foltz et al., 2020]. Al día de la fecha y de acuerdo a lo establecido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), la misma estipula la necesidad de cumplir con valores de conductividad hidráulica de 1×10^{-7} cm/s para conseguir de manera efectiva el objetivo de aislamiento del sistema.

Debido a las características heterogéneas del medio poroso, existen problemas relacionados con la predicción de la conductividad hidráulica de manera precisa y confiable [Ren et al., 2016]. Estudios de laboratorio han demostrado que esta propiedad depende de una gran variedad de parámetros, entre los cuales se puede mencionar la porosidad, saturación, contenido de arcilla, tipo de fluido, presión intersticial,

distribución del tamaño de poros, tortuosidad y otros factores geométricos [Lambe y Whitman, 1991; Montoro y Francisca, 2010; Jang et al., 2011]. Sin embargo, a pesar de la complejidad, numerosos investigadores han sugerido expresiones para el comportamiento esencial de la conductividad hidráulica de los suelos. La ecuación más utilizada al momento consiste en la expresión de permeabilidad intrínseca “K”, propuesta por Kozeny- Carman, a partir de la derivación de las ecuaciones de Poiseuille trabajando sobre flujo en tubos capilares realizando analogías con la ley de Darcy, enunciada a continuación [Mitchell y Soga, 2005]:

$$K = k_h \left(\frac{\mu}{\rho g} \right) = \frac{1}{k_0 T^2 S_0^2} \left(\frac{e^3}{1+e} \right) S^3 \quad [2-2]$$

Donde “ k_h ” es la conductividad hidráulica, “ ρ ” es la densidad del fluido, “ g ” es la gravedad, “ k_0 ” representa un factor de forma de poro, “ T ” la tortuosidad, “ S_0 ” el área de superficie mojada por unidad de volumen de partículas, “ e ” la relación de vacíos y “ S ” el grado de saturación del suelo.

Para el caso en el cual el suelo se considere totalmente saturado ($S = 1$), y denominando C_s a la función que considera la geometría de los poros ($k_0 \times T^2$) la ecuación anterior puede quedar expresada como:

$$k_h = C_s \frac{\rho g}{\mu} \frac{1}{S_0} \left(\frac{e^3}{1+e} \right) \quad [2-3]$$

Para alcanzar una conductividad hidráulica suficientemente baja, se utilizan frecuentemente arcillas compactadas o mezclas de arcillas con suelos locales. En particular, el agregado de una cantidad baja de bentonita (5 a 10% en peso seco) permite obtener la conductividad hidráulica especificada por la mayoría de las regulaciones internacionales para la construcción de barreras de impermeabilización ($k < 10^{-7}$ cm/s) [Francisca et al., 2009]. En este caso, la adición de bentonita al suelo loésico local reduce el tamaño de los macroporos en muestras compactadas promoviendo un mayor contacto entre partículas, resultando por tanto en reducciones en los valores de conductividad hidráulica [Alercia Biga, 2020].

Además, los estudios realizados demuestran que la adición de bentonita en las muestras incrementa la resistencia a la compresión simple; identificando a su vez, que en estado no saturado el volumen de infiltración disminuye con el incremento en el porcentaje de bentonita hasta un 9% [Alercia Biga et al., 2015].

Desde el punto de vista mecánico, incorporaciones de bentonita próximos al 6% logran incrementar la resistencia a compresión simple de las mezclas. Desde el punto de vista hidráulico un 6% de bentonita en mezclas compactadas con energía de compactación estándar logran reducir los valores de conductividad hidráulica aproximándose al cumplimiento de la normativa establecida para barreras [Biga, 2020].

Investigaciones realizadas a partir del permeado de muestras limo-bentonita compactadas con agua destilada demostraron que el tiempo de permeado tiene una influencia insignificante en las variaciones en “k”, sin importar el contenido de bentonita añadido [Francisca y Glatstein, 2012]. Sin embargo, las muestras permeadas con solución de nutrientes y/o lixiviados mostraron una marcada disminución de la conductividad con el paso del tiempo. Esta observación queda vinculada, según las investigaciones realizadas, a fenómenos de colmatación, comportamiento no Newtoniano del fluido y actividad bacteriana que se desarrolla en los poros de la mezcla [Francisca et al., 2009].

2.6 SÍNTESIS DE LOS ASPECTOS MAS RELEVANTES

En este Capítulo se presenta una revisión bibliográfica sobre la estabilización de suelos de grano fino a partir de reacciones puzolánicas. Las principales conclusiones se remarcan a continuación.

- ✓ Las reacciones puzolánicas que gobiernan los procesos de cementación en materiales como el Hormigón, requieren del cumplimiento de ciertas condiciones para que las mismas se desarrollen de manera óptima. En este contexto las reacciones químicas requieren de la presencia de puzolanas que

presenten granulometría predominantemente fina, de un ambiente alcalino de elevado pH junto con la presencia de agua en el medio.

- ✓ Las puzolanas, como materiales inorgánicos capaces de reaccionar generando productos de hidratación bajo las condiciones óptimas, pueden clasificarse de acuerdo a su origen como puzolanas naturales o artificiales. Dentro del primer grupo se encuentran los materiales que provienen principalmente de materiales rocosos piroclásticas, cenizas volcánicas o tobas volcánicas; es decir, materiales que presentan elevado contenido de sílice. En cambio, dentro del grupo de las puzolanas artificiales se encuentran aquellos materiales que derivan de un proceso de producción industrial.
- ✓ El material puzolánico permite contribuir a las propiedades de una mezcla cementicia a través de la actividad hidráulica, puzolánica o ambas; la actividad puzolánica de los materiales define la capacidad de estas puzolanas para producir componentes que tienen la propiedad de cementar el resto de las partículas presentes en las mezclas. La formación de la capa ligante que da lugar al proceso de cementación entre partículas se puede identificar a partir de la formación de silicatos, aluminatos y aluminosilicatos de calcio (CSH - CAH - CASH). Estos procesos de cementación a partir de reacciones puzolánicas son comúnmente aprovechados para estabilizar suelos de grano fino.
- ✓ Las técnicas comunes de estabilización comprenden procesos físicos a partir de la estabilización mecánica o bien procesos químicos a través de agregar aditivos en los mismos.
- ✓ La compactación resulta la técnica de estabilización mecánica comúnmente adoptada. Este proceso comprende la densificación de un suelo a través de la expulsión de aire reduciendo la proporción de vacíos presente en el mismo, a partir del uso y aplicación de compactadores mecánicos, rodillos y apisonadores con la adición de agua.
- ✓ Las técnicas comunes de estabilización química consisten en la adición de materiales aglutinantes como cemento y cal en los suelos. Si bien las mejoras que se obtienen a partir de las reacciones puzolánicas son significativas, estas técnicas implican elevados impactos ambientales asociados. Por este motivo, en el último periodo de tiempo se ha fomentado la investigación sobre el

comportamiento de subproductos industriales para su potencial uso como agentes estabilizadores, con el objetivo de minimizar el daño ambiental producido reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero, el uso de recursos naturales y los costos de los materiales de construcción.

- ✓ El desafío planteado consiste entonces en reutilizar los desechos de la mejor manera posible; de esta manera se han fomentado en las últimas décadas, las investigaciones sobre las propiedades de los residuos determinando su viabilidad para ser utilizados como materiales estabilizadores. El enfoque sostenible planteado combina la necesidad de reducir el consumo de materiales como cemento y cal, con la gestión eficaz de los desechos generados en diversas industrias. En este marco se plantea la posibilidad de reutilizar los residuos para la estabilización de suelo. Las investigaciones realizadas al momento abarcan materiales como cenizas volantes, restos de demoliciones, fibras o escorias.
- ✓ En particular, las escorias han sido utilizadas en diversos proyectos de ingeniería, como aglutinante en producción de materiales de construcción, o como estabilizador de suelos arcillosos o bases para pavimentos, demostrando siempre mejorar las características mecánicas de las mezclas analizadas incrementando su durabilidad
- ✓ Los suelos loésicos locales, utilizados en diversos ámbitos y proyectos, presentan problemáticas relacionadas al colapso del estrato. Por tal motivo se ha investigado la posibilidad de estabilizar estos suelos con los aglutinantes comunes ya mencionados (cemento y cal). Sin embargo, ante la necesidad imperiosa de reducir el consumo de estos, se investiga en la actualidad diversos métodos para lograr su estabilidad.
- ✓ En este marco, el estudio de los procesos de estabilización a partir de la reutilización de escorias siderúrgicas resulta un tema novedoso que no ha sido investigado previamente, dando lugar al desarrollo de este trabajo de investigación.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 INTRODUCCIÓN

A lo largo del siguiente capítulo se presenta la caracterización de los diversos materiales con los que se llevó a cabo este trabajo de investigación. Se mencionan las técnicas de muestreo y metodologías empleadas para lograr las caracterizaciones requeridas, junto con los equipos utilizados para llevar a cabo las mediciones.

A su vez, se presentan las principales características del suelo y líquidos empleados tanto para preparación de las muestras como para la ejecución de los ensayos, describiendo los procedimientos llevados a cabo para analizar y estudiar las mismas.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS Y MATERIALES GRANULARES UTILIZADOS

En el siguiente apartado se presentan los tres materiales sólidos utilizados: limo loésico, escoria siderúrgica y bentonita. En la Tabla 3-1 se resumen los diferentes estudios y ensayos físicos, químicos y mineralógicos llevados a cabo para la caracterización de los mismos.

El limo utilizado es un típico sedimento loésico también conocido en la literatura como loess pampeano [Teruggi, 1957; Zárate, 2003]. Se utilizó un loess típico de la provincia de Córdoba, Argentina, que fue muestreado mediante excavación exploratoria a 2 m de profundidad en el campus de la Universidad Nacional de Córdoba, en proximidades de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Las coordenadas del punto de muestreo son 31°26'08,33" S; 64°11'33,13" O. Una vez muestreado el suelo, se procedió a preparar el material para su caracterización, mediante procedimiento de cuarteo compuesto por trituración y tamizado, para trabajar con una muestra representativa y

lo más homogénea posible. La muestra obtenida se analizó para determinar las principales propiedades físicas, químicas y mecánicas.

Las escorias siderúrgicas utilizadas fueron suministradas por el grupo "Ternium Siderar" localizada en San Nicolás, provincia de Buenos Aires, Argentina. Las mismas se obtienen a partir del proceso de fabricación del acero, siendo la producción mensual de esta fábrica de aproximadamente 230,000 toneladas de laminado en caliente por mes. Esto genera aproximadamente 45,000 toneladas de escorias que no se reutiliza en el proceso productivo y se vende, en parte, a la industria cementera como materia prima. De acuerdo a la información provista por el generador de escorias, el remanente de las mismas que no es reutilizado o vendido, se dispone como un residuo sólido urbano.

La bentonita utilizada es una arcilla compuesta esencialmente por minerales del grupo de las esmectitas. La misma es una bentonita sódica, provista por la firma "Bentonitas del Lago", la cual proviene del yacimiento Castiglioni Pes & Cía., en el lago Pellegrini en la provincia de Río Negro. Estas arcillas son de origen marino de edad cretácica [Musso et al., 2016; Musso et al., 2022].

Tabla 3-1 Caracterización sobre los materiales utilizados.

Análisis	Limo [L]	Escoria [SS]	Bentonita [B]	Estándar seguido
Granulometría	x	x		ASTM D422
Gravedad específica	x	x	x	ASTM D854
Límites de Atterberg	x		x	ASTM D4318
Clasificación unificada de suelos	x	x	x	ASTM D2487
pH	x	x		VN - E35 -89
Conductividad eléctrica [CE]	x	x		Luxan et al., 1988
Sales solubles	x	x		VN – E18 - 89
Expansión libre	x	x	x	ASTM D5890
Difracción de rayos X [DRX]	x	x	x	
Análisis petrográfico de minerales	x			
Microscopía electrónica de barrido [SEM]	x	x	x	
Espectrometría de masa [ICP]		x	x	

3.2.1 Ensayos de caracterización física

Todas las pruebas se realizaron siguiendo los métodos estandarizados de las normas de ensayo ASTM. Para el análisis granulométrico de la fracción granular gruesa de las muestras se utilizó la serie de tamices IRAM, complementando el análisis con el método del hidrómetro para caracterizar la fracción fina de las muestras pasante tamiz N° 200 (ASTM D422). Además, se incluyeron ensayos de gravedad específica (ASTM D854), límite líquido e índice de plasticidad (ASTM D4318), peso unitario (ASTM D4254) y clasificación unificada de suelos (ASTM D2487), [ASTM 2022].

Luego de haber realizado el proceso de caracterización y con el objetivo de trabajar con muestras que presentasen características de suelo similares, se procedió a separar la fracción de limo pasante tamiz N° 40, la cual se preservó para su posterior utilización.

En la Figura 3-1 se presentan los resultados obtenidos a partir de los ensayos de granulometría realizados, mientras que en la Tabla 3-2 se detallan los principales atributos obtenidos de la caracterización física realizada sobre los materiales granulares utilizados.

A partir de los resultados expuestos, es posible clasificar a los materiales de acuerdo a la Clasificación Unificada de Suelos (USCS). En función de la granulometría y del índice de plasticidad el limo loésico utilizado se puede clasificar como un limo arcilloso (CL-ML). De manera similar, de acuerdo a los resultados del análisis granulométrico realizado sobre la escoria, la misma puede clasificarse como una arena pobremente graduada con bajo contenido de partículas finas (SP). Por lo tanto, los agregados utilizados en este trabajo también pueden denominarse bajo el nombre de arena de fundición. Por último, de acuerdo a los resultados obtenidos para la bentonita, ésta puede clasificarse como una arcilla de alta plasticidad (CH).

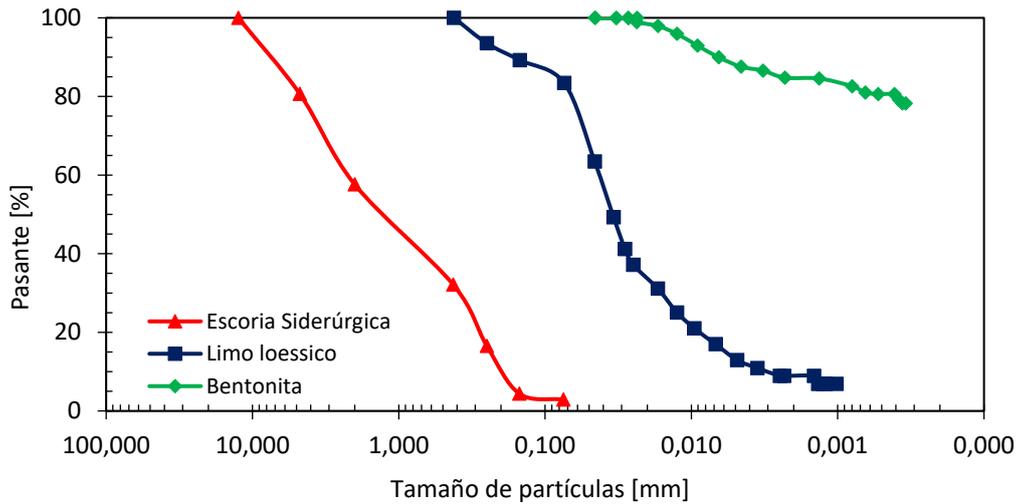


Figura 3-1 Curvas granulométricas de los materiales: limo loésico, escoria siderúrgica y bentonita.

Tabla 3-2 Propiedades geotécnicas de los materiales.

Propiedades	Limo	Escoria	Bentonita
Gravedad específica	2,64	3,16	2,74
Partículas < 0.075 mm [%]	83,43	2,88	100,00
Partículas < 0.002 mm [%]	9,00	-	84,80
Límite líquido. LL [%]	24,70	-	343,00
Límite plástico. LP [%]	19,02	-	89,00
Coefficiente de uniformidad. Cu	20,00	10,50	-
Coefficiente de curvatura. Cc	2,06	0,34	-
USCS	CL-ML	SP	CH
Sales solubles [%]	-	1,04	-

3.2.2 Caracterización mineralógica

Para identificar y cuantificar las fases cristalinas presentes en los materiales granulares utilizados se realizaron ensayos de difracción de rayos X (DRX) de polvos. Para ello se analizaron las muestras mediante difractómetro PaNalitical X'Pert PRO de geometría tipo Bragg-Brentano. Los barridos se realizaron en el rango angular de 8 a 100° 2θ, con un paso de 0,026° 2θ, tiempo de conteo de 19 segundos por paso, fuente operativa en 40 kV y 40 mA y detector PiXel.

La detección de las fases cristalinas presentes en cada muestra se hizo mediante comparación con los patrones almacenados en la base de datos *Powder Diffraction Files* (PDF-2010-ICDD), mientras que la cuantificación de las fases se realizó por análisis Rietveld de los datos de difracción, usando el programa FULLPROF[®] y modelos cristalográficos correspondientes, extraídos de la base de datos *International Crystallographic Structure Database 2018*.

En la Figura 3-2 se muestran los difractogramas obtenidos por DRX en muestras de limo y escoria, mientras que la Tabla 3-3 y Tabla 3-4 se mencionan las fases identificadas. A partir de los resultados obtenidos se observó que el limo utilizado se encuentra compuesto principalmente por fases minerales de plagioclasas, muscovita y cuarzo, y en menor proporción por fases de caolinita y calcita (Figura 3-2 (a) y Tabla 3-3). En la muestra de escoria se detectó elevado porcentaje de hidróxido y carbonato de calcio como así también presencia de carbono, calcio y hierro (Figura 3-2 (b) y Tabla 3-4).

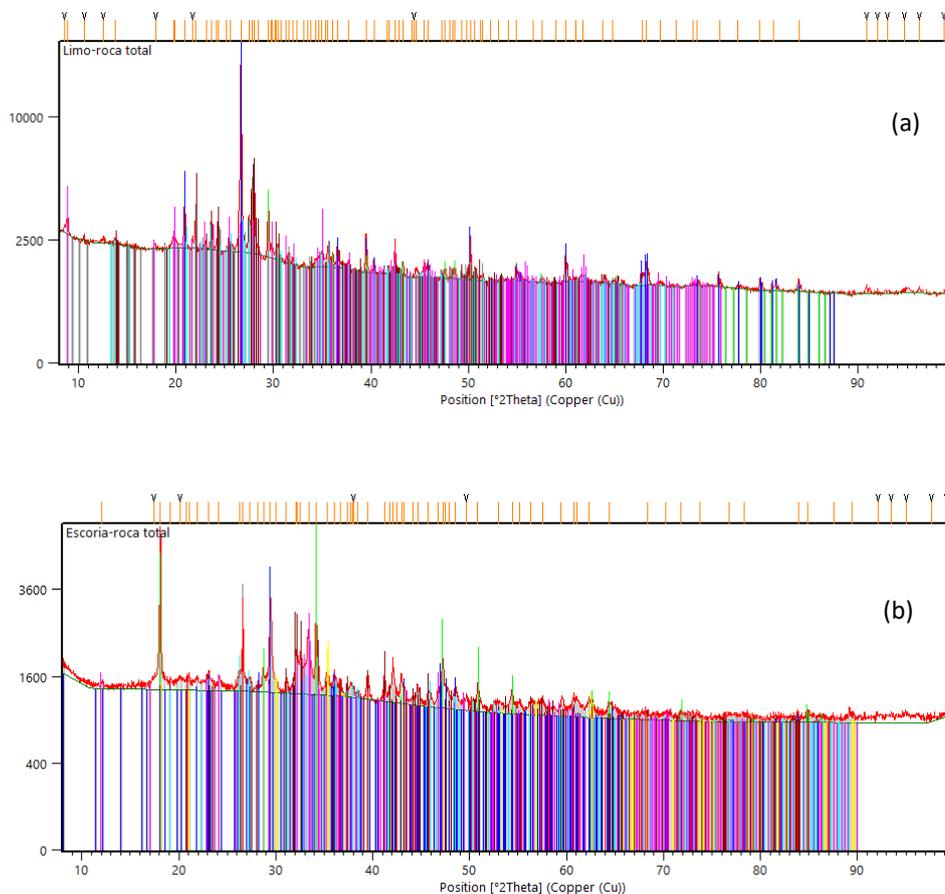


Figura 3-2 Difractograma obtenido por DRX en muestras de limo- roca total (a) y escoria - roca total (b).

Tabla 3-3 Fases identificadas por DRX realizado en el loess.

Fase identificada	Fórmula química teórica	[%] en masa
Cuarzo	SiO ₂	17
Calcita	CaCO ₃	4
Plagioclasa	(Na-Ca) (Si-Al) ₃ 8	64
Muscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	21
Caolinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	5

Tabla 3-4 Fases identificadas por DRX en la escoria.

Fase identificada	Fórmula química teórica	[%] en masa
Cuarzo	SiO ₂	7(1)
Calcita	CaCO ₃	12(1)
Aragonito	CaCO ₃	7(1)
Portlandita	Ca(OH) ₂	19(2)
Larnita	Ca	20(2)
Magnetita	Fe ₃ O ₄	8(1)
Srebrodskita	Fe ₂ Ca ₂ O ₅	9(1)
Acnita	NaFe(Si ₂ O ₆)	5(1)
Grafito	C	12(1)

De acuerdo a la información provista por el proveedor de bentonita, se clasifica a la misma como material de alta pureza, la cual contiene como mineral principal montmorillonita sódica en un 90% como mínimo. La Figura 3-3 presenta el difractograma de la bentonita sódica utilizada, realizada por Musso [Musso et al., 2011], mientras que la Tabla 3-4 presenta los minerales constituyentes de la misma.

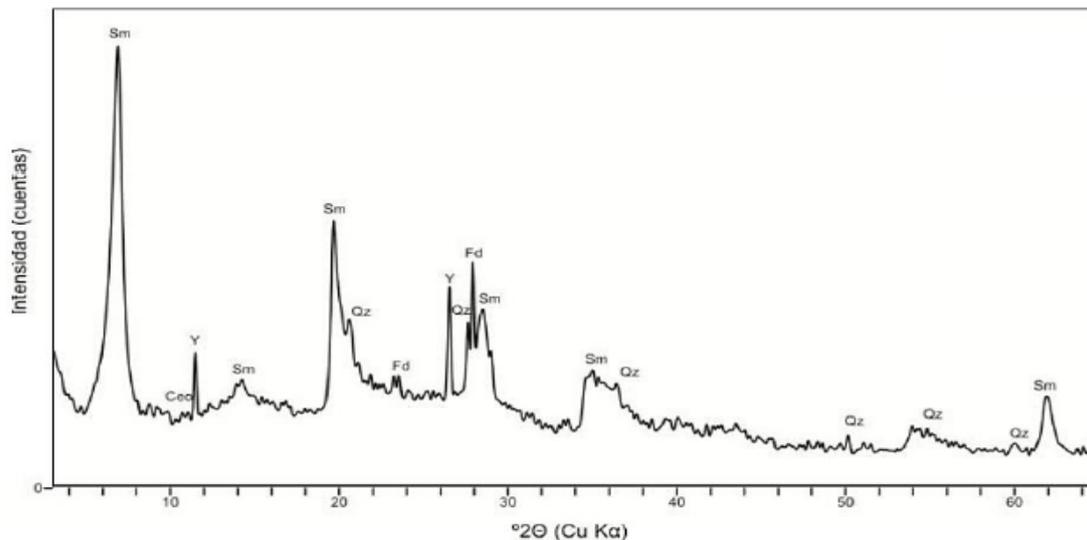


Figura 3-3 Patrones de difracción de rayos X de la muestra de Bentonita CATAE. Qz: cuarzo, Fd: feldespatos, C: calcita, Y: yeso, Ceo: Ceolita, Sm: Esmectita [Musso, 2011].

Tabla 3-5 Fases identificadas por DRX en la bentonita CATAE. * Carbonatos indeterminados [Musso et al., 2010].

Fase identificada	Fórmula química teórica	[%] en masa
Esmectita	$(Al, Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2$	90
Cuarzo	SiO_2	$2 \pm 0,5$
Yeso	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	1,5 - 2
Feldespato	$(K, Na, Ca, Ba, NH_4)(Si, Al)_4O_8$	< 1
Calcita	$CaCO_3$	0,4 *
Zeolita		3 - 4

De manera complementaria, para determinar la composición mineralógica del limo se realizó un análisis petrográfico sobre una muestra de sedimento suelto de grano fino de aproximadamente 50 g (Figura 3-4). Sobre esta muestra se realizaron observaciones mediante microscopía óptica de polarización con el objetivo de identificar las principales fases minerales y describir de esta manera las partículas constituyentes de la muestra. Estas observaciones fueron realizadas en el Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (CICTERRA), instituto de doble dependencia (CONICET-UNC). En una primera instancia la muestra enviada fue cuarteada y montada sobre un portaobjetos de vidrio utilizando resina epoxi. El material adherido al epoxi fue luego reducido en espesor y pulido hasta obtener una lámina de 30 μm de espesor.



Figura 3-4 Muestra de loess suelto.

De acuerdo al análisis microscópico, la muestra corresponde a un sedimento limo-arenoso, predominando los tamaños finos sobre los medios en una matriz limo-arcillosa en un 80 – 85%, y predominando el limo sobre la arcilla. Desde el punto de vista petrográfico este puede clasificarse como un suelo franco limoso. Los fragmentos clásticos son de forma principalmente angular a sub-angular, con escasas partículas sub-redondeadas a redondeadas.

En la fracción comprendida entre 1,00 y 0,06 mm se identificaron principalmente partículas monominerales y fragmentos líticos (rocas), mientras que en la fracción inferior a 0,06 mm también fue posible identificar minerales arcillosos, calcita, circón y apatita. En la Figura 3-5 se puede observar la textura del sedimento analizado, mientras que en las Figura 3-6, Figura 3-7, Figura 3-8 y Figura 3-9 se logran identificar las partículas monomierales y los fragmentos líticos presentes en la muestra.

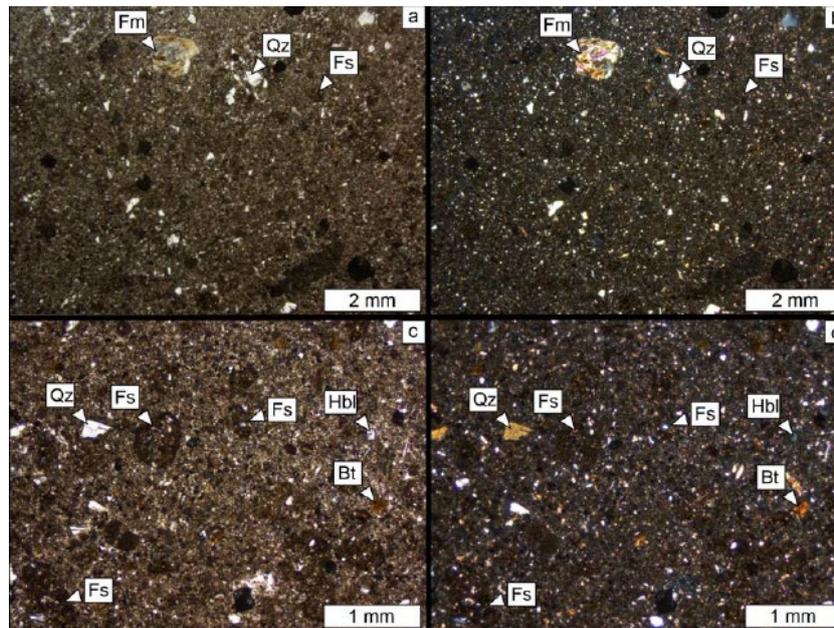


Figura 3-5 Fotomicrografías (a y c, nicoles paralelos; b y d, nicoles cruzados). a) vista general del loess suelto. b) mismo sector a NX. c) detalle de loess suelto d) mismo sector a NX. Qz: cuarzo, Fs: fragmento sedimentario, Fm: fragmento metamórfico, Hbl: hornblenda, Bt: biotita.

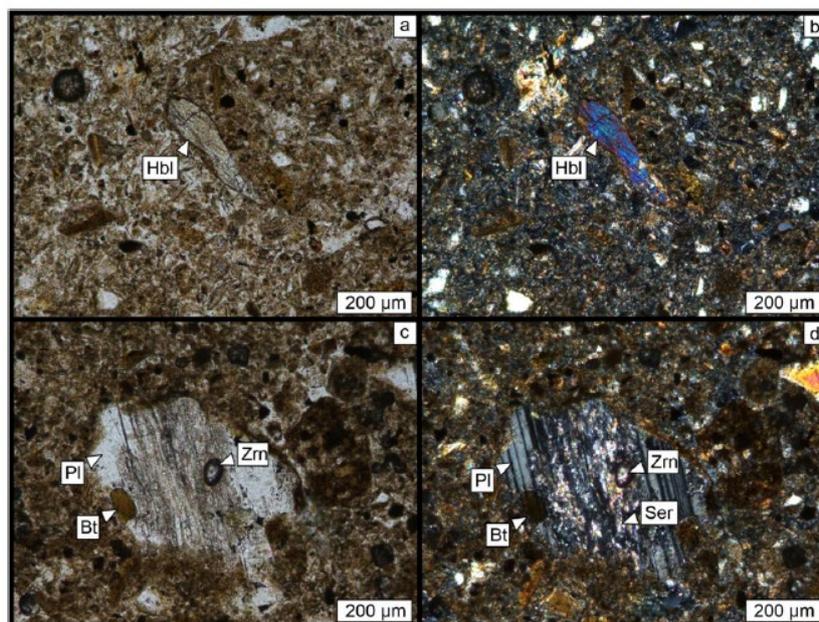


Figura 3-6 Fotomicrografías (a y c, nicoles paralelos; b y d, nicoles cruzados). a) detalle de loess, identificación hornblenda. b) mismo sector a NX. c) detalle de loess, identificación de plagioclasa. d) mismo sector a NX. Hbl: hornblenda, Pl: plagioclasa, Bt: biotita, Zrn: circón, Ser: sericita.

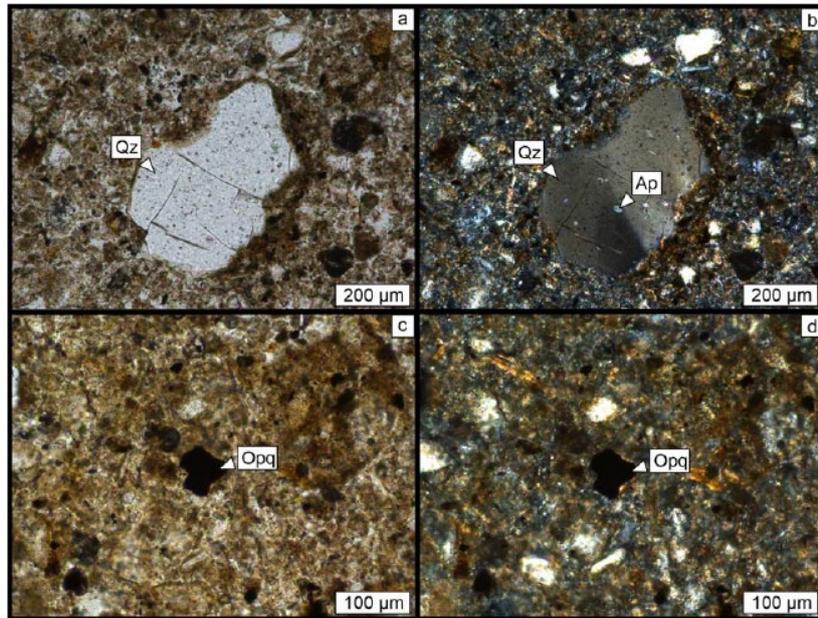


Figura 3-7 Fotomicrografías (a y c, nicols paralelos; b y d, nicols cruzados). a) detalle de loess, identificación cuarzo. b) mismo sector a NX. c) detalle de loess, identificación de mineral opaco. d) mismo sector a NX. Qz: cuarzo, Ap: apatita, Opq: Mineral opaco.

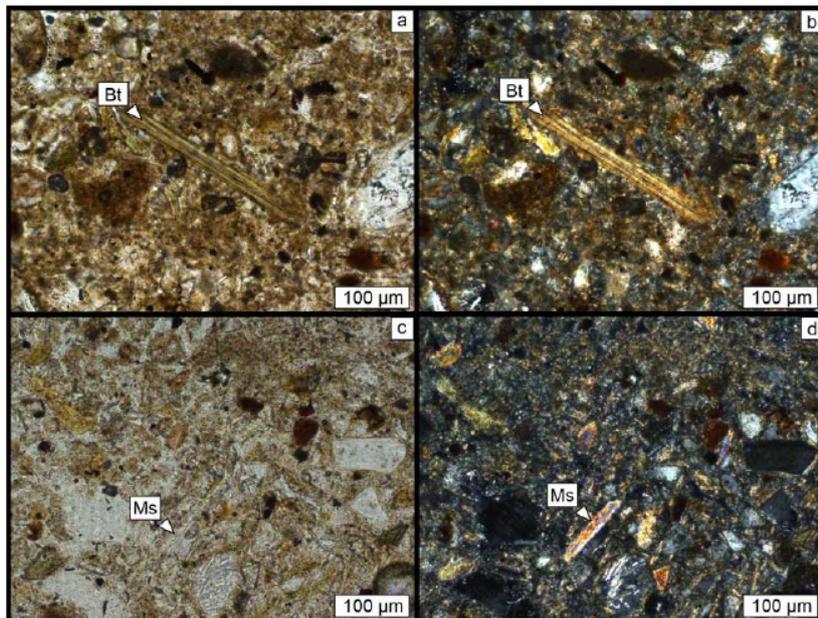


Figura 3-8 Fotomicrografías (a y c, nicols paralelos; b y d, nicols cruzados). a) detalle de loess, identificación biotita. b) mismo sector a NX. c) detalle de loess, identificación de muscovita. d) mismo sector a NX. Bt: Biotita; Ms: muscovita.

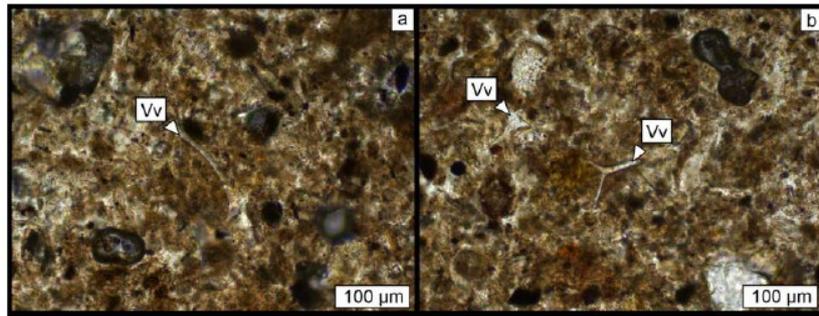


Figura 3-9 Fotomicrografías (a, nicols paralelos; b, nicols cruzados). a) detalle de loess, identificación triza de vidrio volcánico. b) mismo sector a NX. Vv: vidrio volcánico.

3.2.3 Caracterización química

La composición química elemental de los materiales se determinó por microscopía electrónica de barrido (SEM) con análisis químico semicuantitativo complementario (EDX). Estos ensayos fueron realizados según lo explicado en la sección 3.4.2.3.

Los resultados obtenidos por SEM en la muestra de limo metalizada con oro trabajada a un voltaje de aceleración de 15 kV, se muestran en la Figura 3-10 y Figura 3-11. Los principales componentes del limo son: oxígeno, carbono, fósforo y silicio con componentes minoritarios de hierro, calcio y azufre.

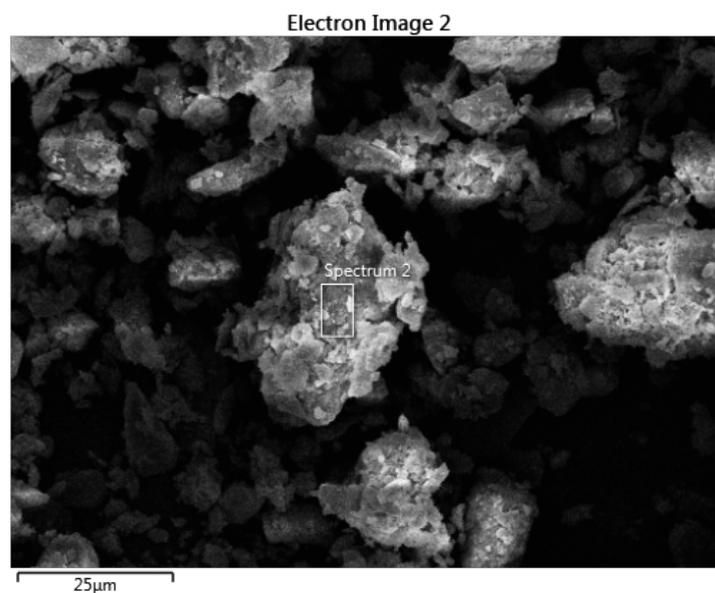


Figura 3-10 Imagen de electrones secundarios tomada por SEM en muestra de limo loésico.

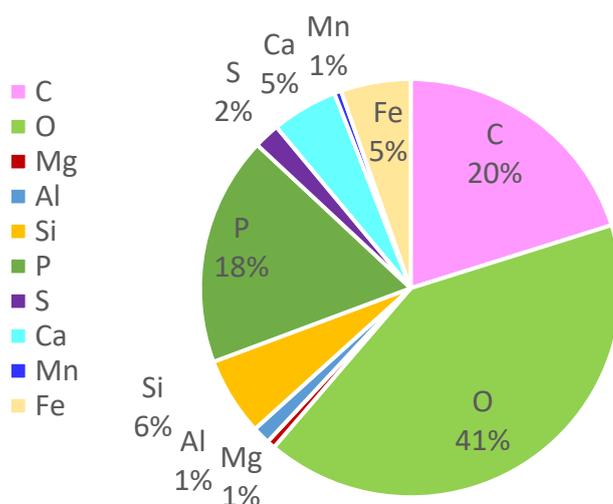


Figura 3-11 Composición química semicuantitativa elemental del limo, analizado por EDX.

Realizando un análisis similar sobre la muestra de escoria metalizada con oro, trabajada a un voltaje de aceleración de 15 kV, se obtuvieron imágenes que permitieron definir la forma y textura de las mismas, identificando que presentan formas variadas, desde sub angulares hasta sub redondeadas. A su vez se puede apreciar que las partículas de mayor tamaño poseen asperezas y se caracterizan por una superficie porosa, rugosa y heterogénea, tal como se puede observar en la Figura 3-12.

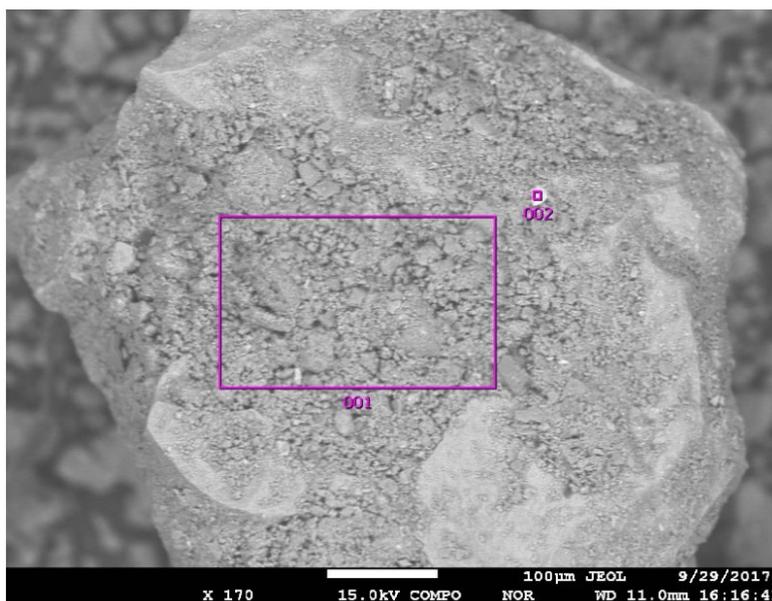


Figura 3-12 Imagen de electrones secundarios tomada por SEM. Textura superficial de la escoria siderúrgica.

Su composición química elemental se presenta en la Figura 3-13; los principales componentes de la escoria siderúrgica utilizada son: calcio, hierro y oxígeno, con pequeñas proporciones de carbono, magnesio, aluminio, silicio y manganeso.

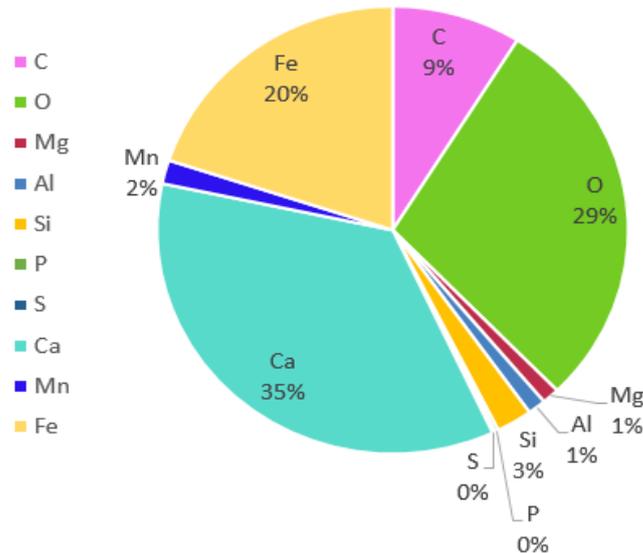


Figura 3-13 Composición química semicuantitativa elemental de las escorias siderúrgicas, analizadas por EDX.

La Tabla 3-6 presenta la composición química de la escoria, información provista por la industria Ternium – Siderar, definida a partir de ensayos de espectrometría de emisión de ICP masa. Como se puede observar, la mayor variación la presentan los compuestos de Hierro, lo cual puede deberse a variaciones dentro del proceso productivo o bien variaciones de los descartes en la colada del acero.

Tabla 3-6 Composición química de la escoria utilizada.

Compuesto	Promedio en masa [%]	Rango [%]
CaO	50,75	37,74 – 58,14
SiO ₂	16,24	9,14 – 20,99
Al ₂ O ₃	1,70	0,72 – 4,29
MgO	6,53	2,45 – 14,65
MnO	4,47	2,88 – 7,70
P ₂ O ₅	2,11	1,18 – 3,85
S	0,10	0,04 – 0,19
Compuestos de Hierro	21,86	12,64 – 41,55
Basicidad (%CaO/%SiO ₂)	3,16	2,07 – 4,93

La composición química de la bentonita utilizada en este trabajo fue provista por Musso y colaboradores, obtenida a partir de ensayos de espectrometría de emisión de ICP masa. La misma se presenta resumida en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7 Composición química de la bentonita utilizada, [adaptada de Musso et al., 2016].

Compuesto	Promedio en masa [%]
SiO ₂	56,66
Al ₂ O ₃	18,7
Fe ₂ O ₃	4,9
MgO	2,68
CaO	1,18
Na ₂ O	3,11
K ₂ O	0,36
TiO ₂	0,43
P ₂ O ₅	0,093
MnO	0,06

3.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS FLUIDOS ENSAYADOS

Los fluidos utilizados para los ensayos de caracterización y análisis de distintas muestras consistieron en: agua destilada [W] y lixiviado natural [LL]. En el siguiente apartado se presentan las propiedades y características de los fluidos utilizados.

3.3.1 Agua destilada

El agua destilada fue utilizada principalmente en los ensayos de caracterización de los distintos materiales, como así también para la preparación de las muestras con las que se realizaron los ensayos a lo largo de la investigación.

La misma se corresponde a agua destilada Tipo III, la cual se caracteriza por poseer una conductividad eléctrica aproximada de 4μS/cm, de acuerdo a lo especificado por la norma ASTM D1193 [ASTM, 2022].

3.3.2 Lixiviado natural

En este trabajo se utilizó lixiviado perteneciente al relleno sanitario Piedras Blancas, ubicado en la localidad de Córdoba – Argentina, provisto por el grupo “Cormecor”. El mismo presenta una densidad de 1,03 g/cm³.

Para identificar los elementos presentes en el lixiviado se realizaron ensayos de espectrometría de masa. Los mismos se llevaron a cabo en el Instituto Superior de Investigación, Desarrollo y Servicios en Alimentos (ISIDSA), en un equipo de Plasma Inducido acoplado a espectrometría de masas (ICP-MS). Esta técnica de análisis inorgánico elemental e isotópico permitió determinar y cuantificar los elementos presentes en el lixiviado. En la Tabla 3-8 se resume la información obtenida, (LDM: valores por debajo del límite de detección o cuantificación del método; SD: desviación estándar).

Tabla 3-8 Concentración de elementos en el lixiviado.

Elementos	[µg/l]	SD
Al	< LDM	-
As	106,00	0,30
Ba	5465,00	38,00
Co	51,30	0,70
Cu	26,00	0,30
Cr	92,00	1,00
Sn	11,70	0,30
Fe	9495,00	153,00
Mn	1599,00	16,00
Hg	0,90	0,03
Ni	203,00	2,00
Pb	15,90	0,40
Se	207,50	3,70
Zn	75,00	2,00
Ca	768,00	5,00
Mg	1618,00	17,00
K	13293,00	88,00
Na	18934,00	237,00

En la Tabla 3-9 y Tabla 3-10 se presenta la caracterización fisicoquímica del lixiviado, aportado por “Cormecor”. El mismo realiza periódicamente análisis químicos, bacteriológicos, determinación de carga orgánica y compuestos organoclorados sobre el agua subterránea y los lixiviados del predio denominado “Piedras Blancas”. Los datos provistos por la empresa y presentados en las tablas corresponden al periodo muestreado en noviembre de 2018.

Previo a su utilización para la ejecución de los distintos procedimientos realizados, el mismo fue filtrado a través del método del papel de filtro, con el objetivo de remover las partículas sólidas en suspensión que pudieran obstruir los poros de las muestras analizadas.

Tabla 3-9 Características fisicoquímicas lixiviado - aportado por Cormecor (DQO: demanda química de oxígeno).

Parámetros	Metodología	Muestra	Unidad
Alcalinidad Total	SM 2320 Método B	(*)	mg/L
Bicarbonatos	SM 2320 Método B		mg/L
Carbonatos	SM 2320 Método B		mg/L
Calcio	UNE-EN ISO 14911	281,62	mg/L
Cloruros	SM 4110 Método B	>5000	mg/L
Color	SM 2120 Método B	8441,55	U.C-Pt/Co
Compuestos fenólicos	SM 5530 Método D	<5	µg/l
Conductividad	SM 2510 Método B	22700	µS/cm
DQO	SM 5220 Método B	2904,32	mg/L
Detergentes	SM 5540 Método C	4,24	mg/L
Dureza Total	UNE-EN ISO 14911	185,97	mg/L
Fluoruros	SM 4110 Método B	1,51	mg/L
Fosfatos		18,73	mg/L
Hidrocarburos Totales de Petróleo	EPA 418.1 - Punto 7.3 Modificado	0,73	mg/L
Magnesio	UNE-EN ISO 14911	144,73	mg/L
Nitratos	SM 4110 Método B	3,96	mg/L
Nitritos		<0,10	mg/L
pH	SM 4500 H+ Método B	7,31	UpH
Potencial Red-Ox		-30	mV
Sólidos Disueltos Totales	SM 2540 Método C	13773	mg/L
Sólidos Sedimentables en 2 hs.	SM 2540 Método F	0,1	ml/L
Sulfatos	SM 4110 Método B	126,94	mg/L
Sulfuros	SM 4500 S Método D	0,03	mg/L
Turbiedad	SM 2130 Método B	146	UNT
Temperatura	SM 2550 Método B	18	°C
SM: Métodos Estándar para la Examinación de Agua y Efluentes, Sociedad Americana de la Salud Pública (APHA), Asociación Americana de Servicios de Agua (AWWA) y la Federación del Medio Ambiente de Agua (WEF)			
EPA: Agencia de Protección Ambiental			
UpH: Unidades de pH			
UNT: Unidades Nefelométricas de Turbiedad			
U.C: Unidades de Color en la Escala Platino-Cobalto			
(*): Análisis irrealizable debido a la presencia de interferencias en la muestra			

Tabla 3-10 Análisis biológico del lixiviado – aportado por Cormecor.

Parámetros	Metodología	Muestra	Unidad
DBO5 (demanda bioquímica de oxígeno)	SM 5210 Método B	200	mg/L
Oxígeno Consumido	Vol. J Rodier	780	mg/L
Bacterias aerobias heterotróficas	SM 9215 Método A	71400	UFC/ml
Bacterias coliformes totales	SM 9221 Método A, B y C	16000	NMP/100 ml
Bacterias coliformes fecales	SM 9221 Método C y E	1700	NMP/100 ml
<i>Escherichia coli</i>	SM 9221 Método C y F modificado	Presencia	-
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SM 9213 Método F	Presencia	-
UFC: Unidades Formadoras de Colonias			
NMP: Número Más Probable			

3.4 PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

3.4.1 Preparación de muestras compactadas

La confección de muestras se realizó con materiales secados en estufa durante 24 hs a una temperatura de 105 ± 1 °C. Las diferentes fracciones de materiales fueron mezcladas en las proporciones correspondientes a la muestra que se quería obtener.

En todos los casos las muestras se prepararon utilizando la granulometría completa de las escorias y la fracción de limo pasante tamiz N° 40. Una vez mezclados los materiales en las fracciones correspondientes se añadió el contenido volumétrico de agua destilada en función de los resultados de compactación obtenidos para cada muestra (ASTM D 4254), hasta obtener una mezcla homogénea que presentase propiedades uniformes. Una vez obtenida una mezcla homogénea se procedió a confeccionar la muestra correspondiente según el ensayo a realizar.

Las mezclas se mantuvieron en cámara húmeda hasta el momento de su análisis. Los tiempos de curado se definieron como: 0, 7, 28, 56, 365 días. Durante dicho periodo las muestras fueron almacenadas bajo condiciones de temperatura y humedad controladas. Con el objetivo de impedir el contacto con el oxígeno presente en el ambiente externo de la muestra, las mismas fueron envueltas en papel de film monitoreando el peso de las mismas.

Se ensayaron muestras compactadas de limo con 0%, 4%, 8%, 12%, 16%, 20%, 24% de adición de escoria (SS) y mezclas compactadas de limo – 12% SS - 6% bentonita (B), como lo indican las tablas Tabla 3-11, Tabla 3-12 y Tabla 3-13.

Tabla 3-11 Ensayos realizados en muestras.

Denominación	Compactación	Compresión simple	Edómetro	Succión
L [0% SS - [limo]]	x	x		x
L - 4% SS	x	x		
L - 8% SS	x	x		
L - 12% SS	x	x	x	x
L - 16% SS	x	x		
L - 20% SS	x	x		
L - 24% SS	x	x		
L - 12% SS - 6% B	x	x	x	x

Tabla 3-12 Ensayos realizados en muestras.

Denominación	Conductividad eléctrica	Expansión libre	Granulometría vía húmeda	Permeabilidad
L - 0% SS [limo]	x	x	x	
L - 4% SS				
L - 8% SS				
L - 12% SS	x	x	x	x
L - 16% SS				
L - 20% SS	x			
L - 24% SS			x	
L - 12% SS - 6% B	x	x		x

Tabla 3-13 identificación óptica.

Denominación	Confección de cortes delgados	Microscopía electrónica de barrido	Microscopía óptica de polarización	Microscopía confocal
L - 0% SS [limo]	x	x	x	x
L - 12% SS	x	x	x	
L - 20% SS		x		x

3.4.2 Determinación de propiedades químicas, ópticas y mineralógicas

3.4.2.1 Determinación del índice de puzolanicidad

El objetivo de esta tipología de ensayos es determinar el índice de puzolanicidad de los materiales mediante metodologías sencillas, lo cual se logra a partir de mediciones de pH y conductividad eléctrica.

Para determinar la magnitud de la reacción puzolánica se siguió la metodología propuesta por Luxan y colaboradores, logrando con método indirecto realizar una categorización de los materiales sobre la base de la actividad puzolánica.

El ensayo consiste en medir la variación de conductividad eléctrica a lo largo de cierto tiempo al incorporar una fracción del material que se desee caracterizar a una solución saturada con hidróxido de calcio. De este modo, si el material analizado es efectivamente puzolánico, los iones libres en la solución son consumidos al reaccionar para formar aluminosilicatos hidratados. A medida que la puzolanicidad del material sea mayor, mayor será el consumo de los iones libres en solución y, por ende, mayor será la variación en la conductividad eléctrica medida [Luxan et al., 1988].

Este método permite clasificar a los materiales según la posibilidad de formar reacciones puzolánicas. Consiste en determinar la caída de conductividad eléctrica que ocurre al cabo de 10 minutos en una solución de 200 mL saturada de hidróxido de calcio a 40 °C, a la cual se le agregan 5 gramos de material seco (suelo, escoria o mezcla de ambos materiales), manteniendo la solución en agitación durante el tiempo de medición. La suspensión del material se obtuvo sumergiendo en la solución un agitador magnético. El control de temperatura se realizó con un termómetro sumergido constantemente en la solución, la cual se dispuso sobre un calentador eléctrico.

Siendo IP el índice de puzolanicidad del material, la clasificación de los mismos se logra a partir de la siguiente ecuación:

$$IP = CE_0 - CE_{120} \quad [3-1]$$

Donde CE_0 = conductividad eléctrica inicial, CE_{120} = conductividad eléctrica a los 120 segundos. Cuando $IP < 0,4$ mS/cm el material se clasifica como no puzolánico, entre 0,4 y 1,2 mS/cm de puzolanidad intermedia y para $IP > 1,2$ mS/cm de puzolanidad alta.

El ensayo se realiza utilizando material seco, por lo cual todos los materiales analizados fueron secados en estufa a ± 105 °C hasta alcanzar peso constante.

Simultáneamente, las mediciones de pH se realizaron en una solución de agua destilada con 5 gramos del material en análisis, con agitación constante, en intervalos de 1 minuto y hasta los 15 minutos.

En la Figura 3-14 se presenta una imagen ilustrativa del equipo utilizado para este ensayo. Las mediciones de los parámetros de conductividad eléctrica, pH y temperatura se llevaron a cabo a través de un sensor múltiple para examinar calidad de agua PS – 2230.

3.4.2.2 *Determinación del pH*

Se determino el valor de pH de los materiales mediante método potenciométrico utilizando pH-metro y soluciones de materiales saturadas.

Se utilizó agua destilada con pH 7 y conductividad 4 μ S/cm junto con un pH-metro HANNA HI-98103 (Checker) con electrodo HI-1270 pH. Las soluciones se prepararon colocando material secado previamente 24 hs en estufa a 105 ± 1 °C hasta obtener peso constante, en 500 ml de agua destilada.

La medición de pH se realizó sumergiendo el electrodo en la solución en constante agitación mediante un agitador magnético a la cual se le añadió 5 gr de material una vez estabilizado el pH de la misma.



Figura 3-14 Ensayo de conductividad eléctrica propuesto por Luxan et al., (1988), junto con los sensores utilizados.

3.4.2.3 Ensayos por SEM

Para lograr determinar cambios en las composiciones se realizaron análisis por SEM trabajando con un voltaje de 3 kV, con análisis químico semicuantitativo complementario (EDX) sobre muestras seleccionadas metalizadas con oro. Estos ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Microscopía Electrónica y Análisis por Rayos X, LAMARX, de la Universidad Nacional de Córdoba. El equipo utilizado, SEM Carl Zeiss Sigma, puede apreciarse en la Figura 3-15 a continuación.

Este microscopio electrónico de barrido de alta resolución posee un cañón de electrones de emisión de campo Schottky optimizado para trabajar en altas resoluciones y bajas corrientes. Cuenta a su vez con detectores de electrones secundarios y retrodifundidos que permiten visualizar simultáneamente información topográfica y de contraste químico.

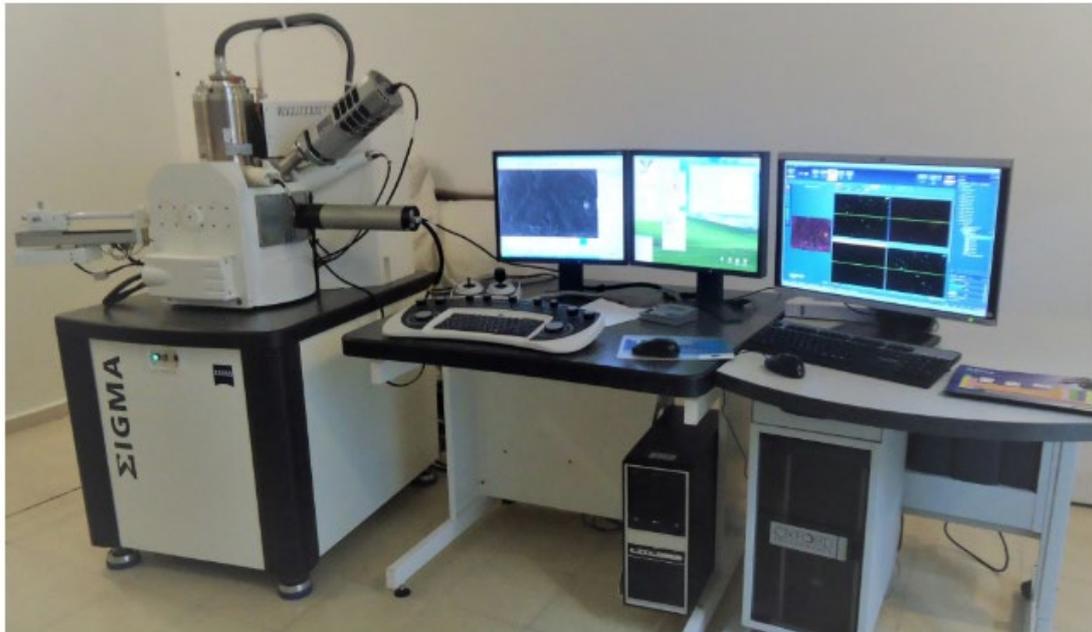


Figura 3-15 Equipo SEM utilizado.

Estos análisis se realizaron sobre muestras de limo-escoria compactadas, secadas y metalizadas con oro, para complementar la información obtenida a partir de los ensayos de conductividad eléctrica, permitiendo detectar reacciones de tipo puzolánicas como así también cambios en la microestructura de las muestras a partir de la observación de las imágenes obtenidas.

A su vez, se realizaron ensayos por SEM sobre los cortes delgados realizados a partir de probetas de limo-escoria como se menciona a continuación.

3.4.2.4 Estudios por microscopía confocal

La microscopía confocal es una técnica óptica de imagen que permite observación de niveles seleccionados dentro de muestras que no sufren de algún proceso de alteración, empleado para reconstituir imágenes tridimensionales.

Mezclas compactadas L – 12% SS con un periodo de curado igual a 0 y 56 días fueron segmentadas luego de realizar la determinación de resistencia a la compresión simple y se observaron bajo microscopio confocal laser con el objetivo de determinar cambios en su estructura interna.

Los ensayos se realizaron en LAMARX, con un microscopio confocal OLYMPUS modelo LEXT OLS4000, como se puede observar en la Figura 3-16. El mismo está totalmente automatizado, usa un láser de 405 nm que cuenta con un spot. El software de control permite visualizar las imágenes 3D realizando mediciones en alta resolución de micro - geometría de superficies rugosas. Su resolución espacial en plano (x, y) está definida por la longitud de onda del Láser, mientras que la resolución en el eje Z alcanza los 10 nm.

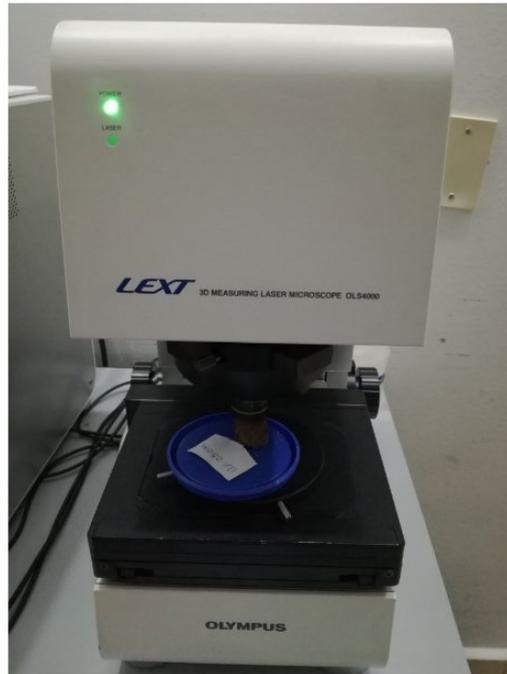


Figura 3-16 Microscopio confocal - LAMARX.

3.4.2.5 Estudios por microscopía óptica de polarización

Para analizar las muestras bajo la técnica de microscopía óptica de polarización se realizaron cortes delgados. Los estudios sobre cortes delgados son utilizados generalmente en rocas para su estudio con microscopio petrográfico. En este trabajo de investigación se realizaron dichos cortes a partir de probetas de limo – escoria con distinto tiempo de curado para determinar la interacción existente entre partículas. Consisten en láminas de material de un espesor de unas 30 μm que se adhieren sobre porta objetos de vidrio mediante resina epoxi.

El objetivo de estos ensayos fue lograr identificar los cambios a nivel microscópico que ocurren entre la fracción fina del limo loésico y las escorias siderúrgicas, detectando las reacciones de tipo puzolánica que ocurren entre estos materiales.

Para la preparación de las mismas se utiliza una sierra diamantada que reduce las probetas al tamaño de un corte delgado. Luego se procede a pulir la superficie de la misma con abrasivos de distintas granulometrías hasta llegar a conseguir una superficie espejada. Una vez conseguida la misma, se pega con adhesivos sobre la lámina de vidrio, sobre la cual vuelven a ser sometidos a un proceso de pulido hasta obtener un espesor de 30 micras. El proceso finaliza una vez que se determina mediante microscopio de luz polarizada el espesor de la muestra, utilizando colores de interferencia de los minerales como indicadores. Estos cortes delgados fueron realizados en el Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (CICTERRA) de la Universidad Nacional de Córdoba. En la Figura 3-17 se puede apreciar el proceso que deriva en el corte delgado de una muestra de roca, mientras que la Figura 3-18 presenta los cortes delgados confeccionados pertenecientes a la probeta L y L-12% SS a 0 y 56 días de almacenamiento.

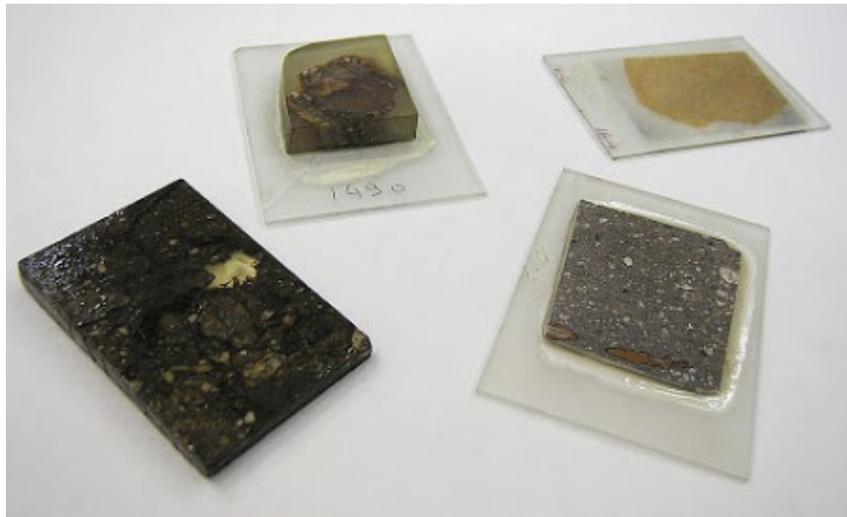


Figura 3-17 Imagen ilustrativa de la confección de cortes delgados.



Figura 3-18 Cortes delgados pertenecientes a las probetas analizadas.

Los cortes delgados fueron analizados bajo microscopio petrográfico Leica DM 4500 P LED con iluminación transmitida – reflejada; luz ultra violeta y cámara digital incorporada que se presenta en la Figura 3-19 . Esta técnica trabaja con un enfoque Z y platina mecánicas, permitiendo lograr la identificación por contraste de algunos minerales como así también permitió obtener imágenes con alta resolución.



Figura 3-19 Microscopio Leica DM 4500 P LED - CICTERRA.

Con el objetivo de determinar con mayor precisión los bordes de interacción entre partículas se trabajó con un Microscopio Leica SM EP presentado en la Figura 3-20. Este microscopio permite la obtención de imágenes de alta calidad a través del empleo de

una lámpara halógena de 35 W sensible al voltaje que suministra una intensidad luminosa optimizada independientemente de las fluctuaciones de voltaje a la vez que presenta un polarizador giratorio y un condensador centrable.

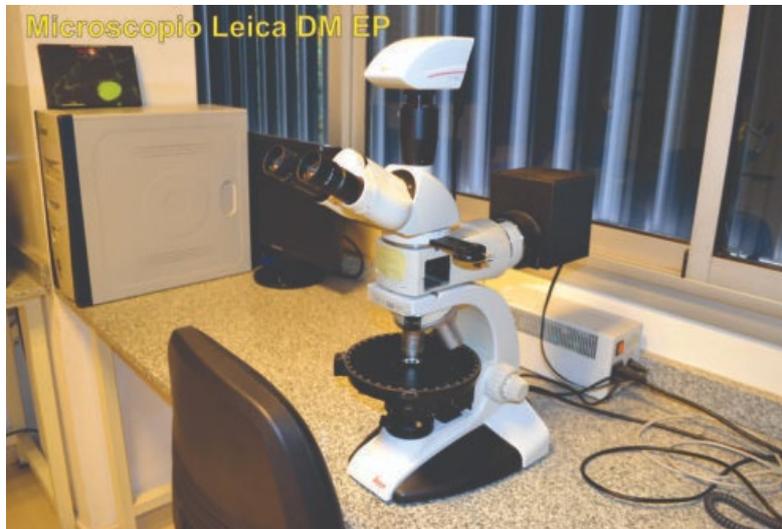


Figura 3-20 Microscopio Leica DM EP - CICTERRA.

3.4.3 Determinación de propiedades mecánicas

Los ensayos de caracterización física consistieron en determinar propiedades en las distintas mezclas ensayadas, determinando para cada una las curvas de compactación correspondiente, la resistencia a la compresión simple, módulos de deformación y otros parámetros geotécnicos necesarios para lograr una caracterización completa de las muestras, como así también para determinar su comportamiento.

Estos parámetros obtenidos se verificaron, en la mayoría de los casos, repitiendo los ensayos sobre 3 (tres) muestras diferentes. A continuación, se describen los procedimientos empleados.

3.4.3.1 Ensayos de compactación

Con el objetivo de determinar el peso unitario seco máximo y el contenido de humedad óptimo de cada muestra analizada se realizaron ensayos de compactación. Para lograrlo se trabajó con probetas moldeadas en un molde de 50 mm de sección y 100 mm de

altura, llenándose el mismo en tres capas de igual altura utilizando la energía de compactación (EC) correspondiente al ensayo Proctor estándar (ASTM D 4254-00).

La compactación dinámica se realizó en un molde tripartido de acero inoxidable como se puede observar en la Figura 3-21. La compactación dinámica se realiza con un pisón de 0,80 kg, con una altura de caída de 39 cm en tres capas con 17 golpes cada una para lograr la compactación correspondiente al ensayo Proctor. A cada probeta se le determinan las dimensiones y su peso para calcular su peso unitario (γ), determinando la humedad de cada una colocando a estufa a una temperatura de 105 ± 1 °C hasta obtener peso constante.

Una vez determinada la curva de compactación de cada muestra se procedió a trabajar determinando distintas propiedades como se especifica a continuación, en distintas condiciones.



Figura 3-21 Molde tripartido de acero inoxidable y pisón de compactación.

3.4.3.2 Ensayos de resistencia a la compresión simple

Con el objetivo de determinar el efecto de las reacciones puzolánicas que ocurren en las muestras ensayadas, y obtener la caracterización mecánica de las mismas, se realizaron ensayos de resistencia a la compresión simple (RCS) sobre muestras compactadas en

distintos puntos de la curva de compactación Proctor obtenida previamente, siguiendo el procedimiento especificado en el apartado anterior.

Se prepararon probetas gemelas sobre las cuales se realizaron ensayos de resistencia a la compresión simple, acorde a lo especificado por la norma ASTM 2166 - 06. Los mismos se realizaron en el marco de carga triaxial Durham Geo-Slope Indicator, modelo S-600 mostrado en la Figura 3-22, el cual tiene una capacidad de compresión de 45 kN, y permite adoptar velocidades de deformación constante de 1 mm/min.

Estos ensayos fueron realizados para distintos puntos de la curva de compactación y para distintos tiempos de curado de las probetas (Tabla 3-14, Tabla 3-15): una vez confeccionadas las muestras, envueltas en papel film para evitar contacto con el aire circundante, se almacenaron en cámara húmeda bajo condiciones de temperatura y humedad controladas. Al momento del ensayo fueron extraídas y pesadas, evaluando de esta manera las posibles variaciones que pudieron ocurrir durante el periodo de almacenamiento.



Figura 3-22 Durham Geo-Slope Indicator modelo S-600 – laboratorio de Geotecnia FCEFyN.

Los ensayos fueron realizados a velocidad de deformación controlada; durante la ejecución del mismo se registra la deformación vertical específica y la correspondiente tensión normal, corregida por el aumento de área de la probeta, obteniendo de esta forma la curva tensión-deformación que caracteriza cada probeta ensayada.

Tabla 3-14 Probetas utilizadas para los ensayos de RCS en punto óptimo de la curva de compactación.

Denominación	Período de curado [días]				
	0	7	28	56	365
L - 0% SS [limo]	x	x	x	x	
L - 4% SS	x	x			
L - 8% SS	x	x			
L - 12% SS	x	x	x	x	x
L - 16% SS	x	x			
L - 20% SS	x	x	x	x	
L - 24% SS	x	x	x	x	
L - 12% SS - 6% B	x	x	x	x	

Tabla 3-15 Probetas de muestras L-12% SS utilizadas para los ensayos de RCS, analizadas con distinto contenido volumétrico de agua.

Muestras L-12%SS; f(w)	Período de curado [días]		
	0	7	28
17% w	x	x	x
19% w	x	x	x
20,5% w	x	x	x
22% w	x	x	x
23% w	x	x	x

3.4.3.3 Ensayos granulométricos en muestras compactadas

Con el objeto de determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de partículas que integran las muestras ensayadas, y analizar su evolución a lo largo del tiempo, se realizaron ensayos granulométricos modificados, siguiendo el procedimiento descrito por Capdevilla [Capdevilla, 2008], en muestras L – 12% SS.

El procedimiento consiste en sumergir la muestra en agua durante 12 horas, buscando la saturación completa de la misma, anulando las fuerzas de succión. Luego la misma se lava sobre el tamiz N° 200 de la serie IRAM, sin ninguna acción mecánica que pueda alterar la estructura original de la muestra. Una vez lavada se procede a determinar la granulometría de la muestra siguiendo la normativa ASTM propuesta.

De esta manera fue posible determinar la presencia de materiales cementados cuyos componentes cementantes no son solubles en agua.

3.4.3.4 Ensayos de compresión confinada

Con el objetivo de evaluar el comportamiento tenso-deformacional de las muestras seleccionadas, se programaron ensayos de compresión confinada sobre muestras remoldeadas preparadas con distinta composición, como se muestra en la Tabla 3-11. Los ensayos se realizaron para diferentes tiempos de almacenamiento para determinar el efecto de la reacción puzolánica sobre el comportamiento de la muestra, como se presenta en la Tabla 3-16:

Tabla 3-16 Ensayos edométricos.

Denominación	Período de curado [días]				
	0	7	28	56	365
L-12%SS	x	x	x	x	x
L-12%SS-6%B	x	x	x	x	

Dichos ensayos se realizaron siguiendo los lineamientos de la normativa ASTM D 2435; el montaje del experimento se realizó utilizando: anillo de bronce de 63 mm de diámetro y 21 mm de altura, dos piedras porosas y un pistón de carga como se puede apreciar en la Figura 3-23. Las muestras a analizar fueron preparadas con distintas energías de compactación dentro del anillo flotante de la celda.

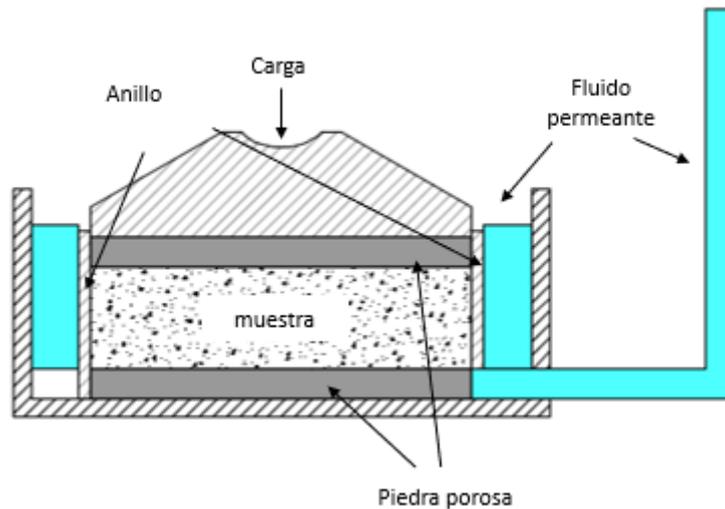


Figura 3-23 Esquema consolidómetro – permeómetro.

La celda, a su vez, se encuentra acoplada a un piezómetro con lo cual se puede obtener información de la permeabilidad de la muestra: este tipo de permeómetro permite medir la conductividad hidráulica de las muestras para distintos valores de presión vertical aplicadas. Este ensayo se realizó permeando con agua destilada como fluido patrón, y lixiviado natural.

En la Figura 3-24 se muestra la celda de consolidación utilizada. Las muestras analizadas fueron preparadas en el anillo, analizando diversas variables como la energía de compactación y/o la composición de las muestras. Así como se trabajó para llevar a cabo los ensayos de resistencia a compresión simple, las muestras fueron analizadas a distintos tiempos de curado, con lo cual las muestras se mantuvieron en cámara húmeda siguiendo el procedimiento mencionado para las probetas del apartado anterior, bajo condiciones de temperatura y humedad controlada.

Los ensayos fueron realizados en una prensa de consolidación hasta tensiones verticales de $8,32 \text{ kg/cm}^2$; el incremento de carga fue aplicado en una secuencia de 26, 52, 104, 208, 416 y 832 kPa, manteniendo la relación $\Delta\sigma/\sigma = 1$. La deformación vertical se registra mediante la presencia de un flexímetro superior con precisión de 0,0025 mm.



Figura 3-24 Celda de consolidación combinada con permeámetro, laboratorio de Geotecnia FCEFN.

A partir de estos ensayos fue posible determinar índices que permiten caracterizar la muestra analizada, presentados a continuación:

- Índice de compresión $C_c = \frac{\Delta e}{\log \frac{P_2}{P_1}}$
- Índice de expansión $C_s = \frac{\Delta e_s}{\log \frac{P_2}{P_1}}$
- índice de compresibilidad $av = 0,435 \frac{C_c}{\frac{P_1 - P_2}{2}}$
- coeficiente de compresibilidad volumétrica $mv = \frac{av}{1 + e_0}$
- modulo edométrico $E_M = \frac{1}{mv}$

dónde:

- “ Δe ” representa la diferencia de relación de vacíos en la rama de compresión;
- “ Δe_s ” representa la diferencia de relación de vacíos en la rama de descarga;
- “ P_1 ” y “ P_2 ” representan las presiones inicial y final para el tramo considerado;

- " e_0 " representa la relación de vacíos inicial de la muestra.

3.4.3.5 Ensayos de succión

Se llevo a cabo el procedimiento descrito por la norma ASTM D5298-10 que permite medir el potencial de succión de una muestra de suelo a través del método del papel de filtro.

Para la ejecución se llevaron a cabo ensayos en las muestras presentadas en la Tabla 3-17, utilizando papel de filtro Whatman No.42.

Tabla 3-17 Probetas para medición de succión.

Denominación	Período de curado			
	0 días	7 días	28 días	56 días
L-12%SS	x	x	x	x
L-12%SS-6%B	x	x	x	x

A partir de aplicar el método es posible relacionar el contenido de agua presente en el papel de filtro, con la succión propia de la muestra, a partir de curvas de calibración propias de cada papel de filtro, como se muestra en la Figura 3-25.

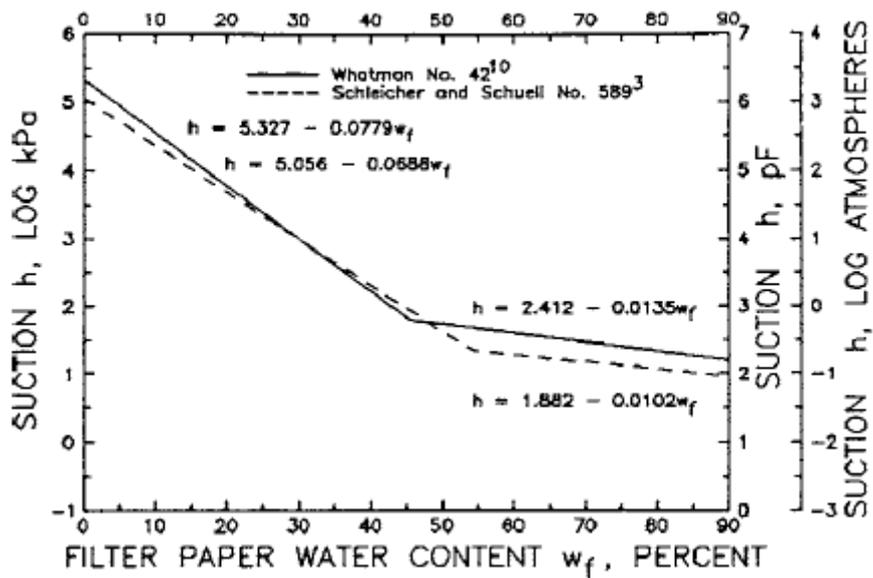


Figura 3-25 Curva de calibración succión- contenido de agua para el metodo papel de filtro [extraído de normativa ASTM D5298].

3.4.4 Determinación de propiedades hidráulicas

Los ensayos de determinación de propiedades hidráulicas se realizaron con el objetivo de evaluar tanto el efecto de la interacción fluido - partícula como la interacción partícula – partícula en las muestras. Estos ensayos se realizaron en muestras L – 12% SS y L – 12% SS – 6% B, utilizando dos tipos de permeámetros: a) permeámetro de celda de consolidación, b) permeámetro de acrílico de pared rígida. Las muestras fueron ensayadas con los dos fluidos caracterizados en la sección 3.3: agua destilada y lixiviado natural.

3.4.4.1 Determinación de propiedades hidráulicas acoplados a ensayos edométricos

El permeado en las celdas de consolidación (a) se llevó a cabo en muestras preparadas al 80% de la EC como se presenta en la Tabla 3-18. El procedimiento consistió en determinar condiciones hidráulicas sobre el ensayo de compresión confinada descritos en el apartado anterior de manera tal que, en cada salto de carga y una vez alcanzada la totalidad del proceso de consolidación, se midieron los descensos en la bureta acoplada al sistema. De esta manera, con el equipo utilizado, presentado en la Figura 3-24, fue posible determinar los valores de conductividad hidráulica de las muestras para distintos valores de presión vertical aplicadas.

Tabla 3-18 Mediciones de conductividad hidráulica en probetas edométricas compactadas al 80% EC.

Denominación	Período de curado [días]				
	0	7	28	56	365
L-12%SS	x	x	x	x	x
L-12%SS-6%B	x	x	x	x	

3.4.4.2 Determinación de propiedades hidráulicas en permeámetros de pared rígida

Las determinaciones de propiedades hidráulicas a través de permeámetros de pared rígida se realizaron sobre muestras preparadas en un molde de acrílico (b) de 50 mm de diámetro y 100 mm de altura que presenta la Figura 3-26, compactando las mismas al

90% y 100% de su energía de compactación como se resume en la Tabla 3-19 de esta sección. Para la confección de las muestras se tuvo en cuenta el procedimiento anteriormente descrito para lograr la compactación de las muestras, cuidando de evitar la segregación de los materiales, preparando las muestras mediante compactación manual dentro del permeámetro, buscando la densidad deseada para cada muestra.

Una vez preparadas las muestras y cerrados los permeámetros de manera hermética asegurando el aislamiento total de la muestra con el exterior, se permeó la misma con flujo ascendente desde el cabezal inferior, captando el fluido excedente por el cabezal superior como se puede apreciar en la Figura 3-26.

Los ensayos se realizaron con gradientes variables siguiendo los lineamientos de la normativa ASTM D5856 (ASTM, 2007), la cual se aplica para flujos laminares unidimensionales con valores de conductividad iguales o menores a 1×10^{-3} cm/s.



Figura 3-26 Celdas de permeado de pared rígida.

La Tabla 3-19 resume las nuestras ensayadas, indicando la energía de compactación y el momento en el cual la muestra fue permeada. La determinación de las propiedades hidráulicas en las muestras L- 12% SS compactadas al 90% de la energía de compactación, se realizó de manera simultánea con agua destilada y lixiviado natural. Dos probetas comenzaron a ensayarse al momento de la preparación, mientras que las dos restantes permanecieron con el canal de ingreso y egreso cerrado, para ser ensayadas al cabo de 56 días. El objetivo de esta metodología aplicada fue estudiar el efecto que tienen las reacciones puzolánicas en las muestras.

Tabla 3-19 Determinación de propiedades hidráulicas en mezclas estabilizadas.

Denominación	Período de curado [días]		Energía de compactación
	0	56	
L- 12%SS	x	x	90%
L- 12%SS-6%B	x		90% - 100%
L- 12%SS (w) -6%B	x		90% - 100%

Las mezclas de limo-bentonita estabilizadas con escoria, fueron ensayadas considerando dos variables. Por un lado, se analizó el efecto de la presencia de sales en la muestra; para ello se ensayaron dos muestras compactadas al 90% de la energía de compactación. Una de ellas se preparó con escorias lavadas, denominada L-12% SS (w)-6% B, mientras que la segunda muestra se preparó con escorias sin ningún tratamiento previo. Por otro lado, el efecto de la energía de compactación en la preparación de las muestras se analizó preparando una muestra compactada al 100% de la energía de compactación en la celda de acrílico, como lo expone la Tabla 3-19.

El proceso de lavado de las escorias consistió en reducir el contenido de sales enjuagando las mismas en agua destilada en reiteradas ocasiones. La determinación del contenido de sales se realizó siguiendo la normativa VN – E18 – 89, la cual permitió determinar la reducción en el contenido de estas arrojando valores de 1,04% a 0,80% luego del proceso de lavado.

Las propiedades de las muestras ensayada se encuentran resumidas en la Tabla 3-20, donde se indica para cada muestra su energía de compactación con su correspondiente relación de vacíos inicial considerando el fluido permeante.

Tabla 3-20 Propiedades de las muestras L-SS-B en probetas de permeabilidad.

Energía de compactación	Denominación	Fluidos permeantes	
		Agua destilada [W]	Lixiviado [LL]
		Relación de vacíos [e] inicial	
90%	L- 12% SS 0d	0,76	0,74
	L- 12% SS 56d	0,75	0,73
	L- 12% SS - 6% B 0d	0,78	-
	L- 12% SS(w) - 6% B 0d	0,77	-
100%	L- 12% SS - 6% B 0d	0,64	-
	L- 12% SS (w)- 6% B 0d	0,62	-

4 REACCIÓN PUZOLÁNICA EN MEZCLAS LIMO- ESCORIA

4.1 INTRODUCCIÓN

En este Capítulo se presenta el mecanismo de estabilización que gobierna el comportamiento de los limos loésicos compactados de la provincia de Córdoba con adiciones de escorias siderúrgicas, el cual tiende a afectar la microestructura de las muestras analizadas.

La hipótesis principal a analizar en esta sección consiste en verificar que en las mezclas de limo con escorias de acería ocurren reacciones de tipo puzolánico produciendo un fenómeno de estabilización del suelo. El mismo afecta la rigidización y resistencia del limo estabilizado ensayado como consecuencia de procesos de cementación que ocurrirían debido a la interacción entre las escorias y la fracción vítrea del suelo.

Para ello se analiza, en una primera instancia, la posibilidad de que se generen condiciones aptas para el desarrollo de las reacciones mencionadas mediante mediciones indirectas de la misma.

En una segunda instancia, una vez identificadas las características de los materiales, se analizan los cambios que se generan en las muestras de limo – escoria en distintas condiciones. Dicho proceso se llevó a cabo mediante SEM, análisis ópticos realizados a través de un microscopio petrográfico sobre cortes delgados y microscopía confocal, trabajando sobre muestras compactadas y estabilizadas mediante la adición de escorias.

4.2 MECANISMO DE REACCIÓN

Las reacciones de tipo puzolánico requieren del cumplimiento de determinadas condiciones en el ambiente en el cual ocurren para su óptimo desarrollo. De acuerdo a lo expuesto en el Capítulo 2, es necesario que exista en el medio determinada finura del material que reacciona, un activador que genere un ambiente elevado de pH a fin de

solubilizar los compuestos silíceos y la presencia de agua en el medio reaccionante [Adami y Rinaldi, 2017; Quintana Crespo, 2005].

Para comprobar la posibilidad de que ocurra el desarrollo óptimo de reacciones de este tipo, se ejecutaron ensayos que permitieron corroborar el cumplimiento de las condiciones necesarias previamente mencionadas.

4.2.1 Alcalinidad en el medio

Con el objetivo de verificar la condición de alcalinidad en el medio, se realizaron ensayos durante los cuales se monitorearon los valores de pH a lo largo del tiempo, de una solución de agua destilada en constante agitación mediante buzo magnético, a la cual se le añaden de a 5 g de escorias una vez estabilizado el valor en el sensor utilizado.

De dichos ensayos se obtuvo que el pH de la solución se incrementa de un valor inicial igual a 7 (nivel de referencia del agua destilada) hasta un valor de 12,18 al cabo de 15 minutos de medición continua una vez añadidas a la misma las escorias, y sin llegar a estabilizarse. La Figura 4-1 muestra los resultados obtenidos, donde se observa la evolución del pH en función del contenido de escoria. Las mismas provocan, en la solución, que el pH se incremente en un comienzo hasta alcanzar un valor aproximado de 11. Luego de este valor, a medida que se incrementa el contenido de escorias el pH de la solución aumenta en menor medida alcanzando valores próximos a 12, luego del cual la constante adición de escorias no representa cambios significativos en las mediciones.

Esta significativa variación en los valores de pH favorece la generación de un ambiente alcalino propicio para que se desarrollen las reacciones de tipo puzolánico, dado por el incremento de pH [Elahi et al., 2021]. La alcalinidad del medio facilita la disolución de los componentes de sílice y alúmina presentes en el material denominado puzolana.

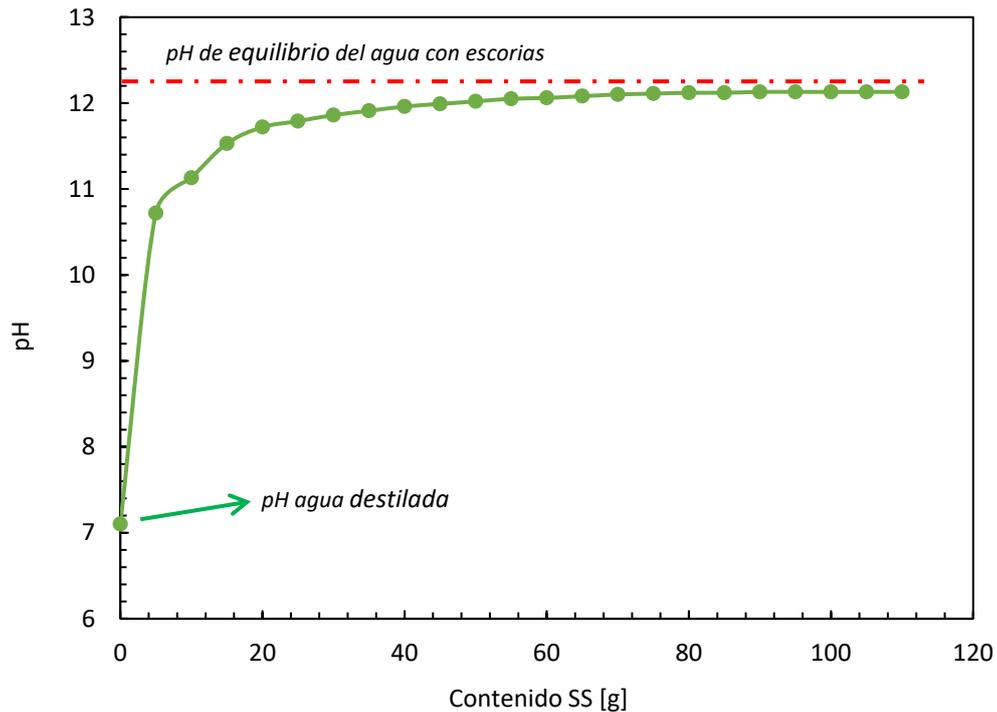


Figura 4-1 Influencia en el pH de una solución acuosa con adición de escorias.

De esta manera, los resultados de este breve ensayo permitieron verificar que las escorias siderúrgicas son las encargadas, en las mezclas analizadas, de desarrollar un ambiente alcalino que favorece la ocurrencia de reacciones de tipo puzolánico, el cual se encuentra incentivado por:

- a) la presencia de óxidos de hierro y de calcio que aportan las escorias (activadores);
- b) la presencia de sílice amorfa y arcilla que aporta el limo (compuestos silíceos);
- c) la presencia de agua o humedad en el suelo.

Las condiciones a) y b) pueden corroborarse en la sección de Materiales y Métodos, (Capítulo 3), donde se encuentran caracterizados, a partir de análisis SEM y DRX, los materiales utilizados en esta sección.

4.2.2 Presencia de sílice amorfa

La ejecución del análisis petrográfico en la muestra suelta de sedimento loésico permitió identificar la presencia de trizas volcánicas en la muestra analizada.

Para verificar la presencia de este componente en las muestras compactadas se trabajó con cortes delgados analizados bajo microscopio óptico de polarización. A partir de observaciones realizadas fue posible identificar, en todas las muestras efectuadas [L-0% SS, y L-12% SS], la presencia de sílice amorfa en forma de trizas volcánicas.

Resultados similares se observaron en las muestras, obteniendo resultados como los que se presentan en la Figura 4-2. La misma representa una muestra de L-0% SS (limo compactado) en corte delgado, visualizando la misma porción bajo microscopio óptico de polarización a nicols paralelos (Figura 4-2a) y nicols cruzados (Figura 4-2b), lo cual permite la identificación de los fragmentos de sílice amorfo. Estas trizas y fragmentos vítreos de sílice fueron identificadas en todas las muestras analizadas. Imágenes similares se muestran en el ANEXO I.

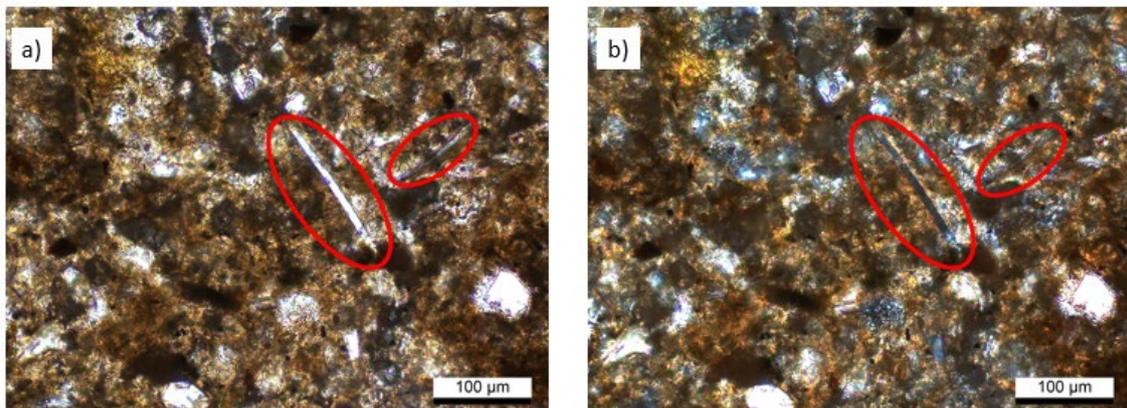


Figura 4-2 Fotomicrografías. Trizas volcánicas (elipses rojas) en muestras de limo compactado [L], identificadas en cortes delgados con nicols paralelos (a) y nicols cruzados (b).

De manera complementaria, se analizaron los cortes delgados bajo microscopía electrónica de barrido. A partir de la confección de mapas composicionales fue posible observar e identificar la presencia de sílice en las mismas. Los resultados obtenidos se

presentan en la Figura 4-3, donde es posible identificar mediante el color “amarillo” los componentes ricos en silicio en el limo ensayado.

Por medio de este análisis fue posible identificar tanto la presencia de trizas volcánicas (presente como sílice amorfa), como también partículas que contienen cuarzo y/o plagioclasa (Tabla 3.2, Capítulo 3).

La importancia de estos compuestos dentro de las reacciones puzolánicas depende del grado de solubilidad que presenten; en este sentido, la fracción de sílice amorfa es la que presenta mayor solubilidad la cual a su vez, incrementa con el aumento del pH del medio. Imágenes similares a la Figura 4-3 se muestran en el ANEXO I, para distintas muestras de limo ensayadas.

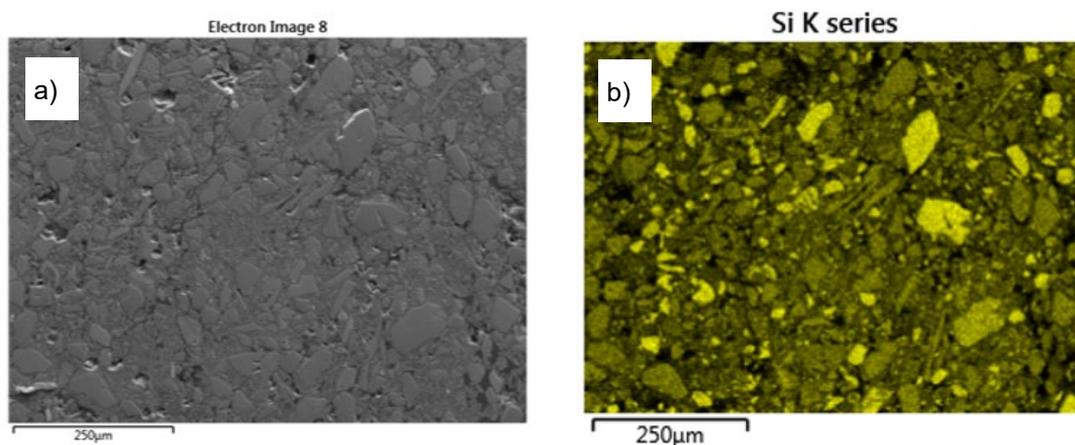


Figura 4-3 Identificación de partículas ricas en silicio en muestras de limo compactado [L]. a) Imagen de electrones secundarios. b) Mapa composicional de silicio.

De esta manera, a partir de mediciones directas de pH combinada con la identificación de sílice amorfa en el suelo, fue posible verificar que existen en las muestras las condiciones para que en el ambiente se desarrollen reacciones de tipo puzolánico. El último factor necesario mencionado, que consiste en la presencia de agua en las muestras, queda satisfecho ya sea debido a la humedad propia del suelo y/o bien, por el agua de amasado utilizada cuando se prepara un suelo compactado.

4.3 EVALUACIÓN DE LA PUZOLANICIDAD

Verificadas las condiciones favorables para que ocurran reacciones puzolánicas en la matriz de suelo, se procedió a clasificar los materiales en función de la facilidad que presentan los mismos para generar reacciones de este tipo. Para ello se caracterizaron las mezclas de acuerdo a su puzolanidad mediante ensayos de conductividad eléctrica (CE). El índice de puzolanidad (IP) se determinó siguiendo la metodología propuesta por Luxan y colaboradores [Luxan et al., 1989].

De acuerdo a este método, y como se mencionó previamente en el Capítulo 2, el índice de puzolanidad (IP) se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$IP = CE_0 - CE_{120} \quad [4.1]$$

Donde CE_0 = conductividad eléctrica inicial de la solución, CE_{120} = conductividad eléctrica a los 120 segundos. El método clasifica los materiales en base a la caída de la conductividad eléctrica en dos minutos de modo que: cuando $IP < 0,4$ mS/cm el material se clasifica como no puzolánico, entre 0,4 y 1,2 mS/cm de puzolanidad intermedia y para $IP > 1,2$ mS/cm de puzolanidad alta.

La Figura 4-4 muestra la variación de la CE con el paso del tiempo al ensayar muestras de limo y escoria puras. Estos resultados muestran que las escorias mantienen valores constantes de conductividad eléctrica ($\Delta CE_{120} \approx 0$), mientras que el material fino limoso muestra una notable caída de CE en su medición.

Los valores iniciales del tiempo 0 son tomados a partir de colocar los materiales a analizar en la solución. El limo presentó, luego de 120 segundos, una caída de CE próxima a 1,2 mS/cm, correspondiéndose a un material con buen nivel de actividad puzolánica. Las escorias, en cambio, presentaron actividad puzolánica nula de acuerdo al método adoptado, dado que la CE mostró cambios insignificantes a lo largo del lapso de tiempo analizado.

Estos resultados confirman que el limo loésico es quien aporta los materiales puzolánicos en la muestra, mientras que las escorias cumplen la función de “activadores” del mecanismo de reacción en cuanto a que su índice de puzolanicidad es nulo, a la vez que se encargan de alcalinizar el medio (Figura 4-1).

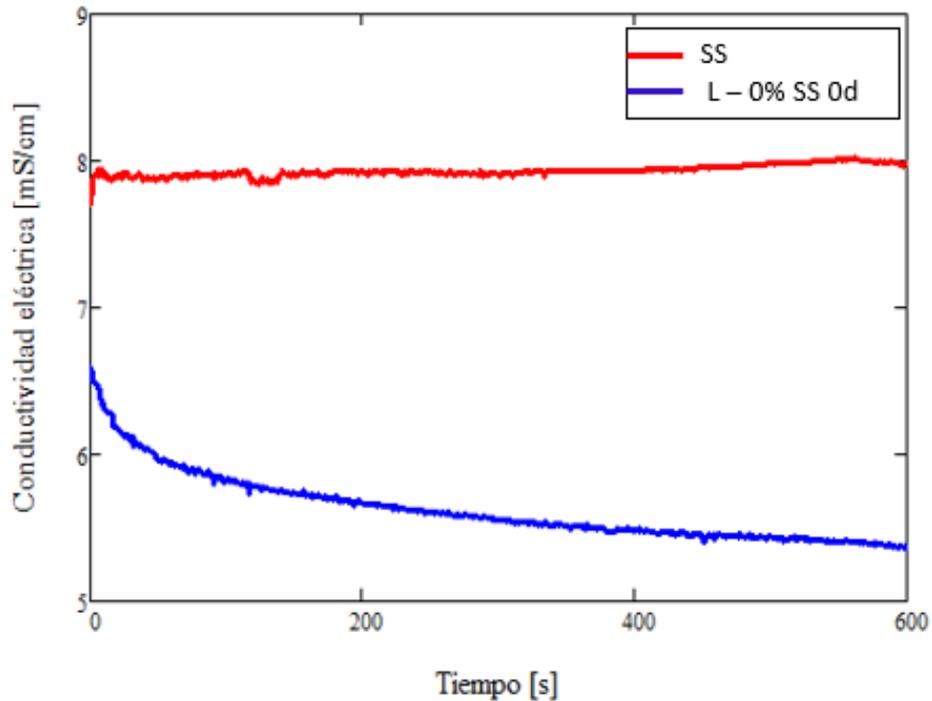


Figura 4-4 Variación de la conductividad eléctrica en función del tiempo de ensayo aplicando el método propuesto por Luxan y colaboradores [Luxan et al., 1989] para limo y escoria.

La diferencia que existe en las ordenadas al origen se encuentra vinculada a la presencia de sales en las escorias. Como se determinó en el Capítulo 3, las escorias presentan 1,04% de sales solubles. Estas sales son las responsables de incremento de conductividad eléctrica en la solución, siendo que al disolverse forman iones que incrementan este parámetro.

La Figura 4-5 presenta la variación de CE que ocurre con el tiempo en mezclas con 20% de adición de SS (L-20% SS). Con el objeto de identificar cambios en el índice de puzolanicidad a medida que la muestra envejece, se analizaron mezclas ensayadas inmediatamente luego de preparada la misma y al cabo de 56 días. Los resultados muestran que la caída de CE, y por tanto el índice de puzolanicidad, disminuye con el

paso del tiempo. A los 0 días el IP de la mezcla resulta igual a 1,4 mS/cm y desciende a 1 mS/cm luego de 56 días. La reducción de este parámetro indica una disminución de la puzolanicidad de la muestra, atribuida al consumo progresivo de sílice amorfa a medida que evolucionan las reacciones puzolánicas. Estas reacciones tienen como consecuencia la formación de silicatos y/o aluminosilicatos de calcio hidratados que cementan las partículas de la muestra (Capítulo 2).

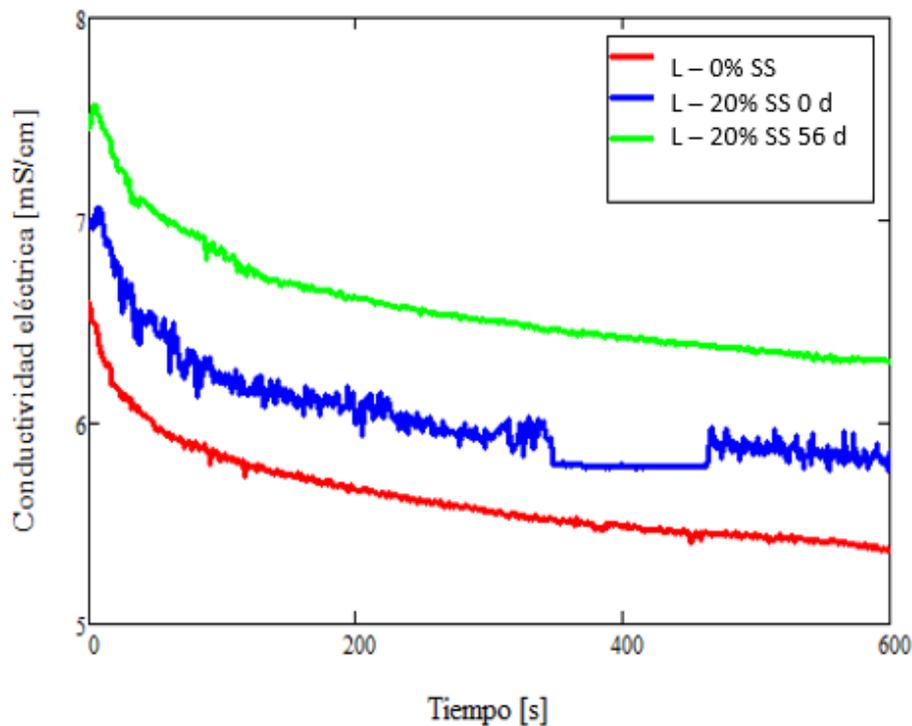


Figura 4-5 Influencia del tiempo de curado en las muestras de limo - escoria en la conductividad eléctrica.

En la Figura 4-5 se presenta, a su vez, la medición resultante realizada en la muestra de limo. Como es posible detectar, existe diferenciación en las mediciones de las muestras con y sin adiciones de escorias. La presencia de sales en las escorias genera que la conductividad eléctrica inicial de ambas muestras con adición sea mayor a la conductividad eléctrica del limo solo. En cambio, la variación que se observa entre las mezclas L-20% SS a 0 y 56 días representa la influencia del envejecimiento de las muestras y el desarrollo de las reacciones puzolánicas.

Con el objetivo de verificar que la variación de las mediciones detectadas en los valores de CE se encuentra vinculada a la presencia de las escorias, se trabajó con un modelo de mezcla, el cual manifiesta la representación de una curva de interpolación que considera la composición volumétrica de la mezcla de limo con escorias expresada mediante la siguiente ecuación:

$$LI = 0,80 * CEL0 + 0,20 * CEE \quad (4-2)$$

Donde LI representa la conductividad eléctrica calculada para la muestra L-20% SS a los 0 días; CEL0 representa los valores de conductividad eléctrica medidos en la muestra L-0% SS y CEE representa los valores de conductividad medidos en la muestra de SS.

En la Figura 4-6 se presentan los resultados experimentales y los valores de CE esperados de acuerdo a la Ecuación (4.2) planteada. Los resultados muestran que el modelo de mezcla planteado presenta una buena aproximación a la medición que se llevó a cabo, representando de manera satisfactoria los resultados. Por tanto, la diferencia detectada en las mediciones de limo y mezclas de limo-escoria se encuentra vinculada pura y exclusivamente a la presencia de las últimas en la muestra.

En base a las observaciones realizadas fue posible verificar entonces, por un lado, que existen las condiciones requeridas para que se desarrollen reacciones de tipo puzolánico entre los materiales que las componen. Por otro lado, fue posible clasificar a los materiales en función de su índice de puzolanidad, determinando de esta manera que el limo loésico presenta un elevado índice de puzolanidad. En base a ello y considerando que la escoria contribuye a un incremento de pH (Capítulo 2), es posible considerar a las mismas como agentes activadores de las reacciones puzolánicas.

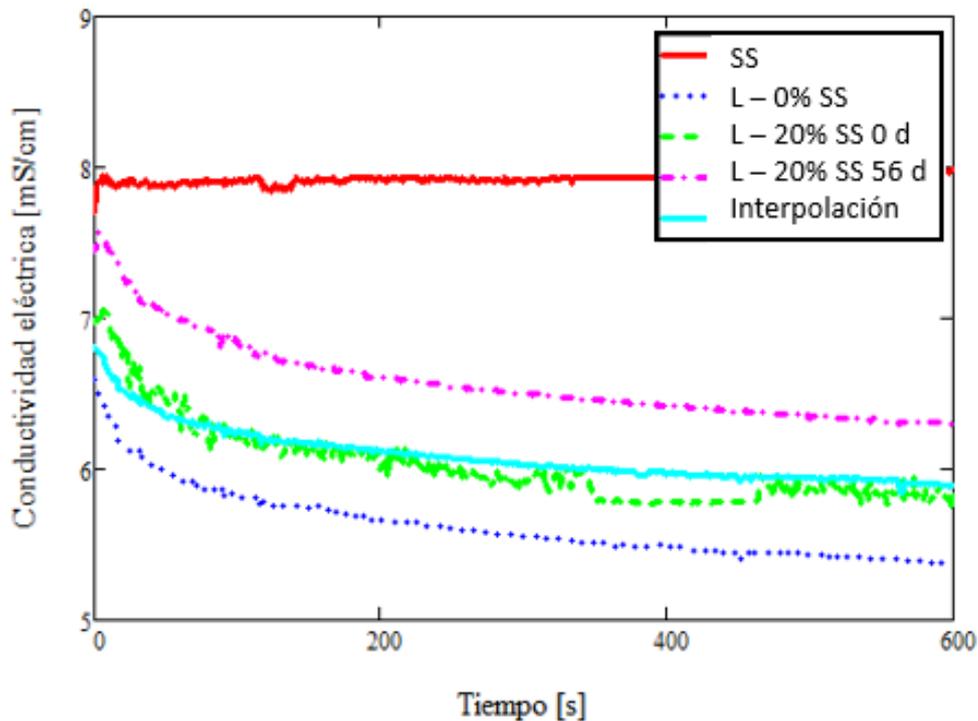


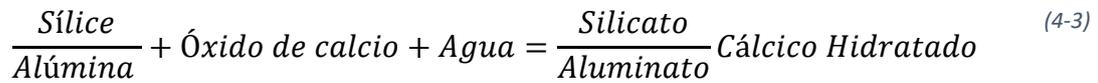
Figura 4-6 Representación modelo de mezcla 80% limo + 20% escoria.

4.4 EFECTOS MICROSCÓPICOS DE LAS REACCIONES PUZOLÁNICAS

Verificada la existencia de las condiciones para que los mecanismos de interacción puzolánico se desarrollen, se investigó el mecanismo y la evolución de la reacción puzolánica en las muestras. Estas reacciones ocurren en diversas etapas, tal como se describió en el Capítulo 2.

En una primera instancia debido a la alta alcalinidad del medio, se produce un desarreglo de las estructuras silíceas o aluminosilíceas. Una vez liberado el ion formado, este se difunde en la solución alcalina, donde la presencia de iones Ca^{+2} en la solución provoca una estabilidad termodinámica que genera la cristalización de los iones silicato y aluminato. Dicho proceso de cristalización comienza a producirse sobre la superficie de los minerales generándose una capa ligante que luego da origen a la cementación entre las partículas. Como resultado se forman silicatos o aluminosilicatos de calcio hidratados similares a los que se obtienen en el proceso de fraguado del cemento Portland.

En la siguiente sección se evalúan de diversa manera los efectos que genera este proceso en las muestras de limo – escoria, el cual puede ser resumido en la siguiente ecuación:



Mediante este mecanismo de reacción se genera una estructura “densa”, que se encarga de cementar las partículas de limo-escoria que componen las muestras analizadas.

Con el fin de visualizar dicha estructura y analizar la presencia de esta capa “ligante” se trabajó con diversos métodos microscópicos con el objeto de identificar el producto de estos mecanismos de interacción.

4.4.1 Espacios vacíos afectados por reacciones puzolánicas

En base a las observaciones detectadas en los análisis de puzolanidad se trabajó con muestras preparadas en condiciones idénticas siendo analizadas luego de 56 días de curado. El objetivo principal de estos análisis consistió en lograr realizar un análisis verificando si los cambios medidos en los valores de puzolanidad se manifestaban en algún cambio físico en las muestras estudiadas debido al desarrollo de estas reacciones.

Las muestras L-12% SS con 0 y 56 días de envejecimiento, preparadas en el punto óptimo de la curva de compactación, fueron estudiadas bajo microscopio confocal laser permitiendo realizar un análisis visual de la estructura interna que presentan las muestras compactadas. La Figura 4-7 ilustra los resultados observados. Como se puede apreciar, estas imágenes 3D hacen posible la reconstrucción de la estructura de poros interna de las muestras analizadas a 0 días de curado (a) y luego de 56 días de curado (b).

La implementación de esta metodología permitió determinar diversos parámetros superficiales como ser distancias o profundidades entre diversos puntos. Con el objetivo

de cuantificar las dimensiones de los poros se realizaron determinaciones de profundidades en diversos puntos de las secciones analizadas. A partir de esto fue posible detectar que la muestra analizada a los 0 días de curado presenta poros de mayor profundidad, arrojando valores promedio de $550\ \mu\text{m}$, mientras que luego de 56 días de almacenamiento las profundidades de los poros se redujeron hasta adoptar valores medios de $180\ \mu\text{m}$. Este efecto es responsable de la distribución de tamaño de poro más uniforme observada en la figura (a) en comparación con la (b), lo cual se traduce en una superficie más homogénea.

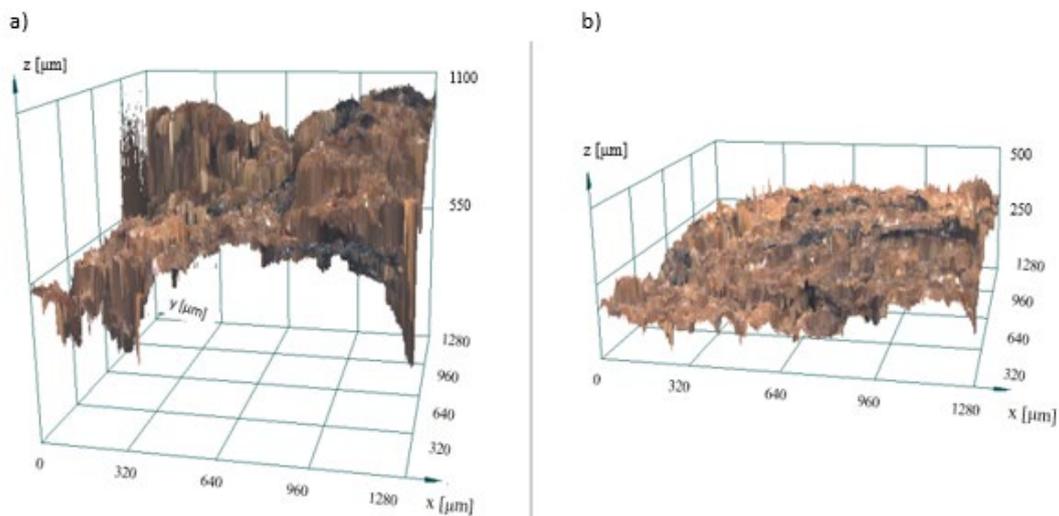


Figura 4-7 Imagen 3D obtenida del tamaño de poros, en muestras L-12% SS, con 0 días de curado (a) y con 56 días de curado (b). Dimensiones del tamaño o profundidad de poros vinculada al eje "z".

Tendencias similares fueron obtenidas para otros tiempos de curado y contenidos de escoria. Este proceso de homogeneización se pudo verificar, a su vez, en muestras L-20% SS con 0 y 56 días de curado a partir de ensayos SEM. La Figura 4-8 presenta las imágenes obtenidas a partir del análisis realizado sobre secciones de ambas muestras metalizadas con oro, ensayadas a 0 días (a) y 56 días (b) de curado. Los resultados obtenidos sugieren que existe un proceso de saturación de poros a medida que la muestra envejece debido a la precipitación de hidrogeles presentando una microestructura arreglada, que tiende a parecer más "densa" y homogénea, corroborando las observaciones realizadas a través del microscopio confocal.

En este marco es posible vincular estos procesos con los procesos de tipo puzolánico que ocurren en la muestra, donde la fracción fina del limo en presencia de las escorias siderúrgicas reaccionan formando una estructura de mayor homogeneidad. En base a las imágenes obtenidas y analizadas, es posible inferir que los productos resultantes del desarrollo de estas reacciones comienzan a ocupar los poros que inicialmente, al momento del moldeo se encuentran “libres” (Figura 4-7 (a) y Figura 4-8 (a)), mientras que al cabo de 56 días la sección analizada presenta una superficie más uniforme lo cual se vincula con la presencia o el desarrollo de estos productos puzolánicos (Figura 4-7 (b) y Figura 4-8 (b)). Los hidrogeles formados a partir de la reacción puzolánica tienden a rellenar los espacios que inicialmente se encontraban vacíos permitiendo de esta forma que ocurra cierta homogeneización en la muestra. Dicha homogeneización se traduce a una estructura más compacta con menor relación de vacíos disponibles.

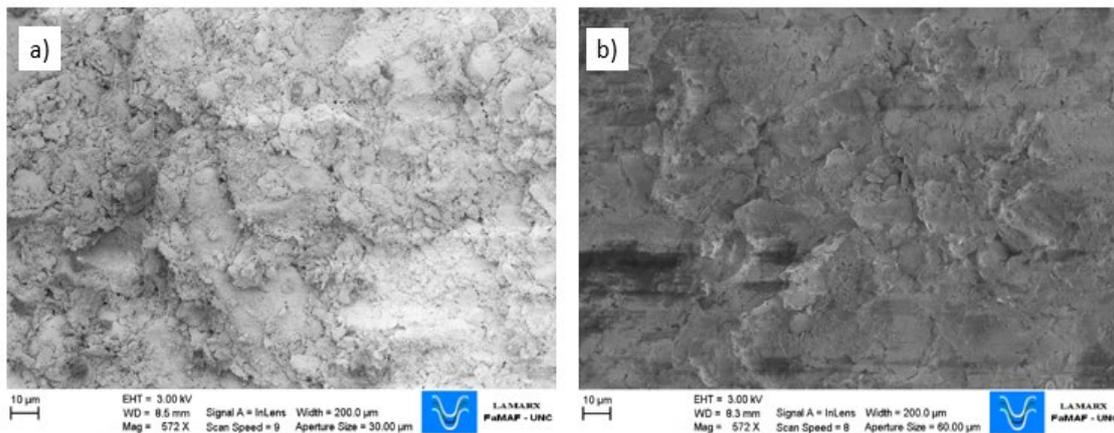


Figura 4-8 Imágenes de electrones secundarios obtenidas por SEM en muestras metalizadas con oro (Au) a) L-20% SS con 0 días de curado. b) L-20% SS luego de 56 días de almacenamiento.

4.5 BORDE DE REACCIÓN

La formación de hidrogeles producto de estas reacciones puzolánicas se evaluó a partir de secciones de cortes delgados realizados en muestras de L-12%SS de 0 y 56 días de curado. Las mismas fueron analizadas mediante microscopios petrográficos con el objetivo de identificar el mecanismo de reacción dentro de las muestras.

La Figura 4-9 presenta la misma sección del corte delgado a nicoles paralelos (Figura 4-9 (a)) y cruzados (Figura 4-9 (b)). A partir de la metodología aplicada, mediante comparación con patrones generados a partir de muestras conocidas, fue posible corroborar la presencia de trizas volcánicas. Las mismas se caracterizan por ser filamentos alargados los cuales cambian de color tornándose isotrópicos: al cruzar nicoles los materiales amorfos se tornan negros. A partir de la combinación de la Figura 4-9 (a) y (b), fue posible confirmar la presencia de sílice amorfa en el limo loésico la cual se solubiliza durante la evolución de las reacciones de tipo puzolánico formando los productos hidratados derivados del proceso de cementación. Resultados similares se muestran en el Anexo I.

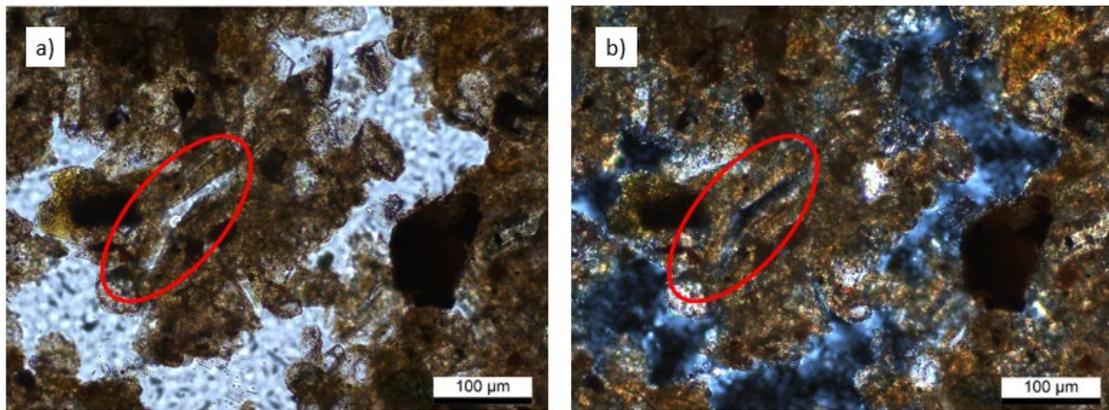


Figura 4-9 Fotomicrografías. Muestra L-12% SS a 0 días; a) Imagen a nicoles paralelos. b) Imagen con nicoles cruzados. Las elipses rojas indican la presencia de una triza de vidrio volcánico.

Habiendo corroborado la presencia de trizas volcánicas en las muestras con adición de SS compactadas, se efectuaron análisis similares en diversas secciones del corte delgado comparando con muestras de referencia con distinto periodo de almacenamiento y a distintas escalas. La Figura 4-10 presenta fotomicrografías de la muestra L-12% SS de 0 días de almacenamiento. Las partículas de escorias en la probeta de 0 días de almacenamiento se presentan inmersas en la matriz fina de limo. Se observa que no existe, *al momento de análisis*, ninguna interacción entre las fases que componen la muestra. Esto queda reflejado por el contacto neto (márgenes bien definidos) entre las partículas de escoria y la matriz fina de limo. A su vez fue posible detectar la presencia de sílice amorfa en las muestras evaluadas a partir de microscopía óptica de

polarización, en las imágenes con nicoles cruzados. Resultados similares se muestran en el Anexo I.

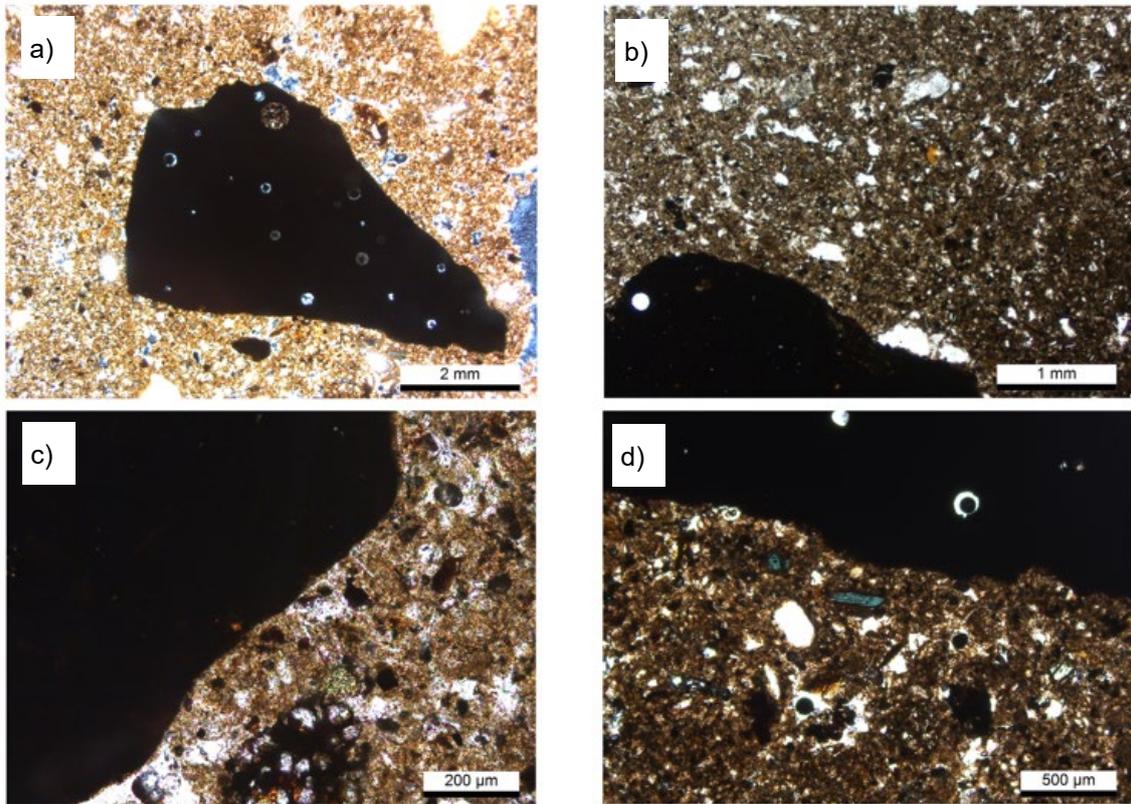


Figura 4-10 Fotomicrografías. a) Partícula de escoria en la muestra L-12% SS, con 0 días de almacenamiento a nicoles cruzados. b-c) Detalle de contacto neto entre la partícula de SS y limo a nicoles paralelos. d) Detalle de contacto entre partícula de SS y limo a nicoles cruzados.

La Figura 4-11 muestra los resultados obtenidos en una muestra de limo con 12% de SS (L-12% SS) luego de haber sido mantenida 56 días en cámara húmeda. En este caso se observa que las partículas de escoria inmersas en la matriz fina de limo manifiestan la presencia de un “borde” difuso. Este borde puede estar generado por la suma de contribuciones de composición química y fracción vítrea del loess junto con procesos de difusión de sílice, proveniente de las fases amorfas, desde la escoria. Esta observación permite inferir que las reacciones puzolánicas que desarrollan hidrogeles evolucionan en las inmediaciones de las partículas de escorias. Esto permite nuevamente identificar que las partículas de escoria son responsables de la alcalinización del medio. De esta forma las partículas de limo en proximidad de las escorias serían las primeras en reaccionar formando productos de hidratación conocidos como hidrogeles. Imágenes similares pueden encontrarse en el Anexo I, para distintas mezclas y tiempos de curado.

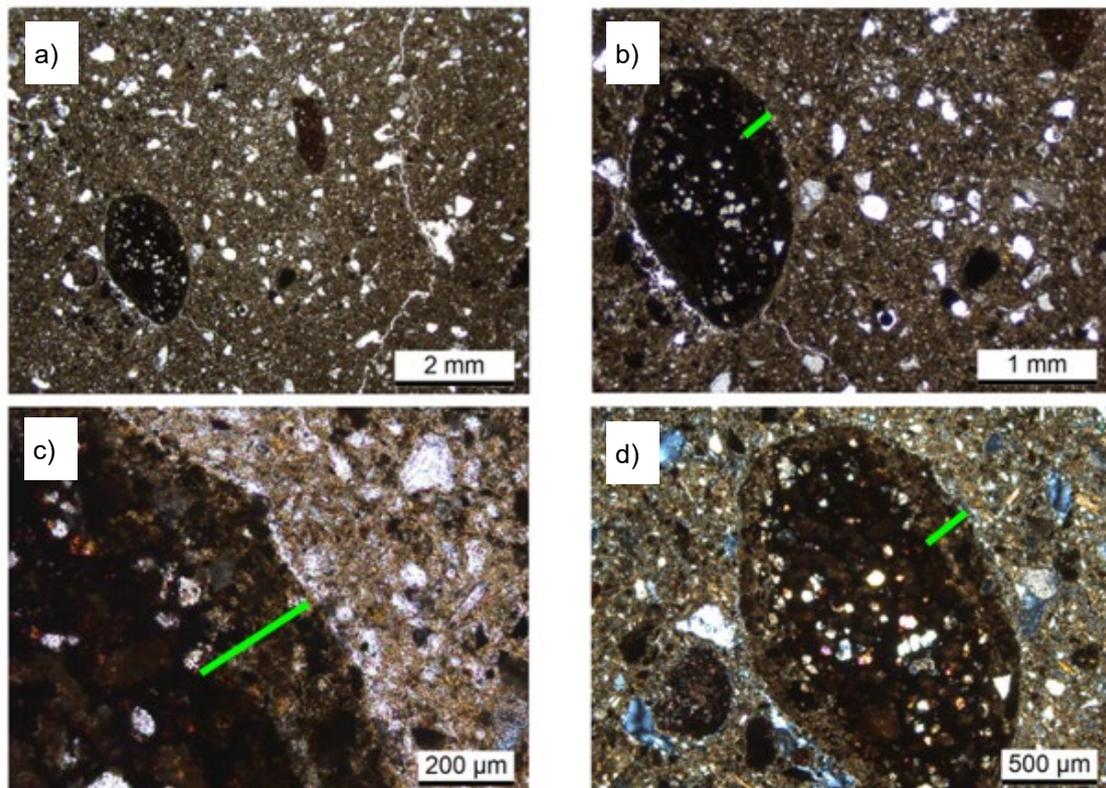


Figura 4-11 Fotomicrografías. a) Partícula de escoria en la muestra L-12% SS, con 56 días de almacenamiento a nicoles paralelos. b-c) Detalle de contacto neto entre la partícula de SS y limo a nicoles paralelos. d) Detalle de contacto entre partícula de SS y limo a nicoles cruzados.

La hipótesis previa fue evaluada a partir de la comparación de diferentes secciones del corte delgado con microscopía óptica de polarización pudiendo identificar que, en las inmediaciones de las partículas de SS, es decir en este “borde” de reacción, no existe presencia de trizas volcánicas. De esta manera existe menor probabilidad de encontrar en estos márgenes, componentes de sílice amorfa o pobremente cristalizada. De esta forma, el margen identificado en las secciones y que caracteriza la sección de 56 días de curado queda atribuida al proceso de cementación que ocurre en las muestras que presentan adiciones de escoria.

Esto sugiere que, a medida que la probeta envejece, las partículas reaccionan y se cementan provocando cambios en la microestructura generando la homogeneización observada en las imágenes de microscopía confocal y SEM.

4.6 MAPAS COMPOSICIONALES

Los cortes delgados fueron estudiados bajo microscopía electrónica de barrido electrónico. A partir de estas observaciones fue posible corroborar la información brindada por análisis previos a la vez que fue posible obtener como resultado mapas composicionales en distintas secciones.

La Figura 4-12 muestra los resultados de las imágenes obtenidas a partir de SEM sobre las secciones delgadas realizadas al momento del moldeo (0 días). En la misma es posible observar nuevamente que las partículas de escoria presentan márgenes bien definidos, pudiendo apreciarse que existe un cambio en la textura de la matriz fina de limo y la partícula de escoria. Para cada imagen se presenta el mapa composicional correspondiente a la misma de la identificación del componente silíceo. Como es posible identificar, la matriz fina de suelo loésico presenta elevada presencia de silicio (Si) en su composición a diferencia de las partículas de SS, que presentan una tonalidad más oscura. Dicho resultado era esperable considerando que de acuerdo a la caracterización de las escorias las mismas presentan tan solo un 3% de Si (Capítulo 3).

La Figura 4-13 muestra imágenes de microscopía electrónica obtenidas en las muestras de 56 días de edad. En la misma puede observarse un halo de color gris claro alrededor de las partículas de escoria, tendencia que se observó sobre todas las secciones y ensayos en mezclas de limo-escoria. A partir de los mapas composicionales estudiados, fue posible detectar que esta película que rodea a las partículas de escoria presenta bajo contenido de sílice; dicha observación permite relacionar a la misma con la formación de los productos de hidratación (Capítulo 2) desarrollados a partir de las reacciones puzolánicas. A su vez, como es posible apreciar en la imagen presentada, el borde identificado previamente mediante análisis microscópico petrográfico presenta un cambio de textura que no se corresponde a la fracción de limo ni a la partícula de SS. Este cambio demuestra que los hidrogeles formados presentan características ópticas diversas a las de los materiales que componen la muestra.

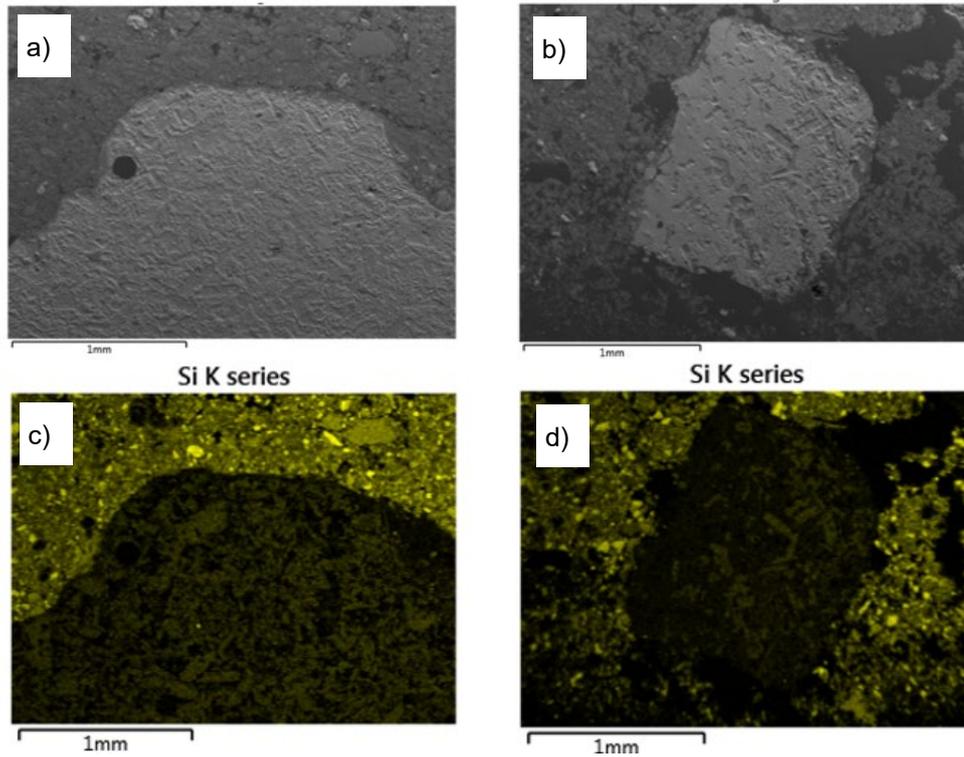


Figura 4-12 SEM-EDS. a y b) Partículas de escoria (gris claro) en L-12% SS a 0 días de almacenamiento (imágenes de electrones secundarios. c y d) Mapas composicionales de Si correspondientes a las imágenes “a” y “b”.

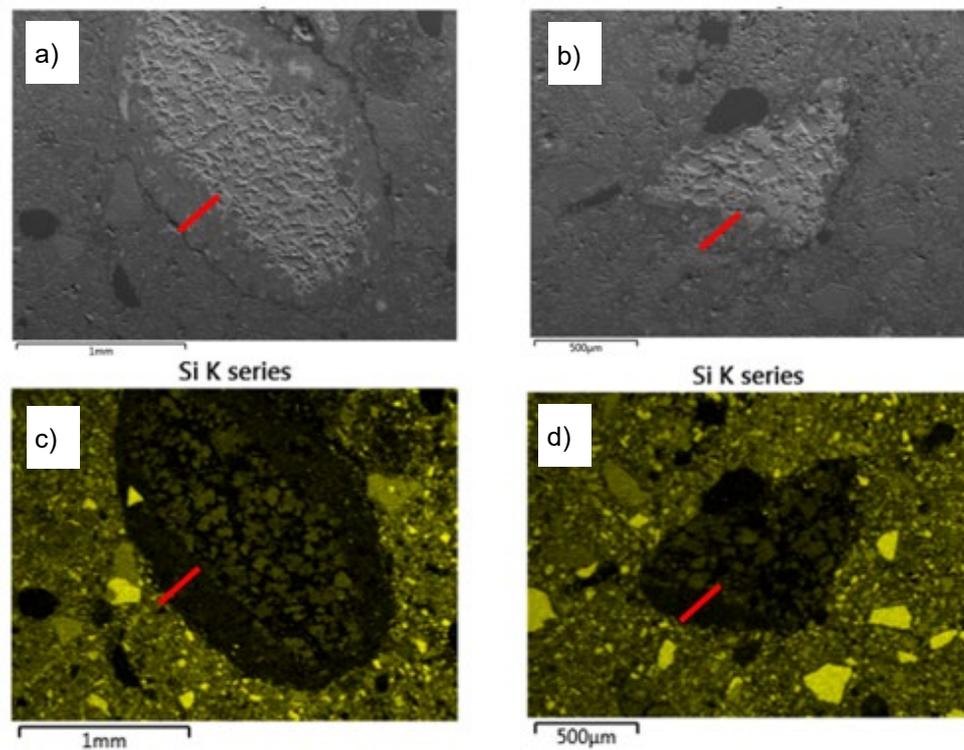


Figura 4-13 SEM-EDS. a y b) Partículas de escoria (gris claro) en L-12% SS a 56 días de almacenamiento (imágenes de electrones secundarios. c y d) Mapas composicionales de Si correspondientes a las imágenes “a” y “b”. Las líneas rojas indican los bordes de reacción en la escoria.

Imágenes similares fueron obtenidas en todos los análisis realizados, resultados que se compilan en el Anexo I.

4.7 CAMBIOS GRANULOMÉTRICOS PRODUCIDOS POR REACCIONES PUZOLÁNICAS

El objetivo de esta sección es identificar los efectos que presenta la formación de hidrogeles en los espacios vacíos entre partículas en mezclas de limo-escoria (L-12%SS).

La Figura 4-14 muestra las curvas granulométricas correspondientes a las probetas L-12% SS a 0, 56 y 365 días de almacenamiento. A partir de los resultados obtenidos es posible identificar que a medida que se incrementa el periodo de almacenamiento de las muestras la curva granulométrica manifiesta una tendencia a desplazarse hacia granulometrías más gruesas. En el caso de la muestra analizada luego de 56 días de almacenamiento, el diámetro nominal D70 de la muestra manifiesta variaciones más distintivas con respecto a la muestra ensayada al momento del moldeo. Este comportamiento indica que el material, a medida que la muestra envejece, disminuye la proporción de partículas finas disponibles en la misma. La única posibilidad de que esto ocurra es que las partículas individuales comiencen a adherirse entre sí formando aglomerados, vinculados con los hidrogeles producto de las reacciones puzolánicas.

Estos resultados permiten corroborar las observaciones microscópicas a partir de las cuales se identificó el proceso de homogeneización con cambios en la estructura de la muestra. A medida que se desarrollan las reacciones puzolánicas las partículas finas de limo se cementan entre sí y con las escorias, con lo cual se ve modificada la granulometría de las muestras.

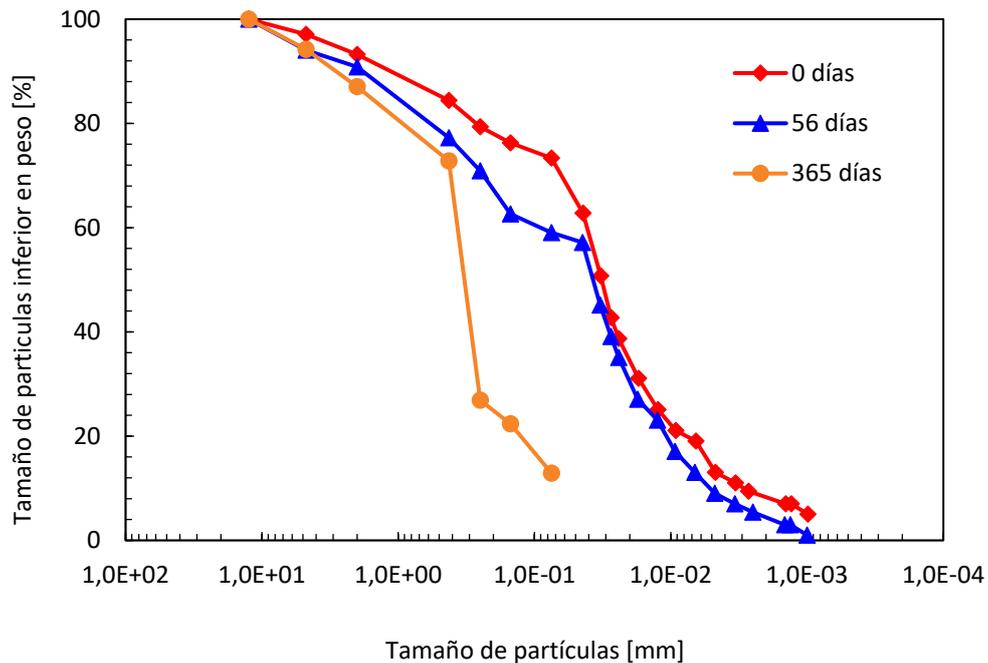


Figura 4-14 Cambios granulométricos observados en muestras L- 12% SS a partir del aumento del periodo de curado.

La Figura 4-15 presenta la evolución de tamaños característicos de partículas en función del tiempo de envejecimiento, durante el cual se han desarrollado las reacciones puzolánicas. Se presentan cambios en el tamaño efectivo de partículas D_{10} , el tamaño medio D_{50} y los diámetros de partículas característicos D_{30} , D_{60} utilizados en la clasificación unificada de suelos. Se destaca que al cabo de 365 días de almacenamiento se producen cambios significativos en la curva granulométrica y diámetros nominales de partícula. Estos cambios tienen como consecuencia una nueva clasificación para la mezcla de suelo-escoria ensayada, a la cual ya le corresponde una clasificación como suelo granular grueso (SM), de acuerdo al sistema de clasificación unificado de suelos.

Los cambios granulométricos observados permiten confirmar que la reducción en los espacios vacíos disponibles con el paso del tiempo, medido a partir de las imágenes 3D (Figura 4-7), se encuentra asociado a la unión entre partículas producidas por los agentes cementantes desarrollados en las reacciones puzolánicas. Dicha tendencia implica que la estructura de la muestra sufre cambios a nivel de contactos entre partículas, dado por las reacciones de tipo puzolánico que ocurren en las muestras.

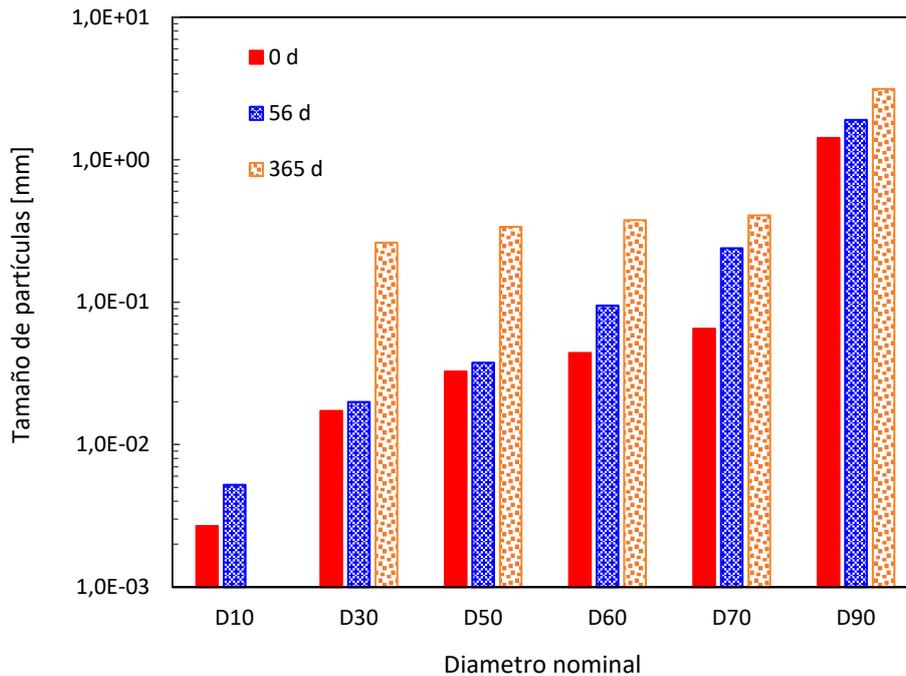


Figura 4-15 Manifestación de cambios granulométricos en los diámetros nominales de las muestras L-12% SS.

Los resultados físicos son consistentes con los efectos que generaría en la muestra el desarrollo de hidrogeles como productos de las reacciones puzolánicas. A partir de las imágenes obtenidas fue posible visualizar el proceso de homogeneización y densificación que sufren las muestras, vinculando el desarrollo de hidrogeles con la reducción en los espacios inicialmente libres en las probetas.

A partir de los ensayos de granulometría fue posible vincular esta formación de hidrogeles en las muestras con diversos procesos de cementación que ocurren entre las partículas de la misma. Estos procesos se traducen en cambios macroestructurales en las muestras analizadas, provocando cambios en la granulometría.

4.8 PRINCIPALES APORTES DEL CAPÍTULO

En este Capítulo se presentó un análisis de los cambios a nivel microscópico que sufre un suelo limoso debido al desarrollo de reacciones puzolánicas. Para favorecer las

reacciones puzolánicas se trabajó con mezclas de limo loésico y escorias siderúrgicas. Las principales contribuciones en este tema se resumen de la siguiente manera:

- ✓ Se corroboró la coexistencia de condiciones óptimas en mezclas de limo-escoria para el desarrollo de reacciones puzolánicas.
 - Se identificó la presencia de sílice amorfa en el limo loésico. Estas trizas y fragmentos vítreos de sílice fueron identificadas en todas las mezclas de limo y limo-escoria ensayadas. El proceso de identificación fue posible debido al éxito de la metodología aplicada.
 - Se desarrolló una metodología basada en análisis petrográficos sobre cortes delgados, combinado con microscopía electrónica de barrido a través de mapas composicionales. En este aspecto, se lograron avances significativos que permiten detectar las reacciones que ocurren en la vecindad de las partículas de escorias dentro de una matriz fina de limo loésico.
 - Se verificó que las escorias ensayadas presentan una muy alta alcalinidad. A través de la metodología aplicada se determinó que la adición de partículas de escoria en el limo genera la alcalinidad necesaria ($\text{pH} > 12$) fomentando el desarrollo de reacciones puzolánicas.
 - Se determinó el índice de puzolanidad del limo y escoria a partir del método propuesto por Luxan y colaboradores [Luxan et al., 1989]. Los resultados obtenidos indicaron que el limo loésico presenta un índice de puzolanidad elevado ($\text{IP} > 1,2$), mientras que las escorias presentan índice de puzolanidad nulo.
- ✓ Se verificó el desarrollo de las reacciones puzolánicas en la muestra a partir de análisis microscópicos realizados sobre probetas limo-escoria con distinto periodo de curado.
 - La implementación de análisis con microscopio confocal sobre las muestras de limo-12% escoria permitió detectar variaciones en los tamaños de poros de muestras con 0 y 56 días de envejecimiento. Se observó una sensible reducción en el valor medio del tamaño de poro

- junto con una superficie más homogénea al cabo de 56 días de almacenamiento.
- A través de ensayos (SEM) sobre cortes delgados de muestras limo-escoria a 0 y 56 días de almacenamiento se detectó que a medida que la muestra envejece presenta una microestructura arreglada, que tiende a parecer más densa y homogénea.
- ✓ Se demostró la generación de bordes de reacción que pueden atribuirse a la generación de hidrogeles a través de observaciones con microscopio petrográfico sobre cortes delgados en muestras limo-escoria.
- En muestras con 0 días de curado se observaron partículas de escoria con bordes bien definidos inmersas en una matriz de limo loésico.
 - En las muestras con 56 días de almacenamiento se observaron cambios significativos en los bordes de las partículas de escoria, detectándose el desarrollo de un borde difuso producido por las reacciones puzolánicas. Esto permitió identificar los sectores donde comienza a desarrollarse la interacción entre la fracción de limo y la escoria adicionada.
 - A partir de observaciones realizadas en microscopía óptica de polarización se identificó en la muestra a 0 días presencia de sílice amorfa en proximidades de la partícula de escoria en la porción de limo loésico. Al cabo de 56 días se observó que no existe presencia de trizas volcánicas en el borde de reacción, observándose un marcado decrecimiento de esta en la muestra. Esta información se corroboró a través de análisis SEM con mapas composicionales, lo que constituye una metodología apta para monitorear las reacciones puzolánicas a nivel de escala de poros.
- ✓ Se identificó el efecto que provoca la cementación entre partículas debido a las reacciones de tipo puzolánico en la granulometría de las muestras limo-escoria. A partir de ensayos granulométricos se detectaron cambios en los diámetros de partículas característicos de las muestras a 0, 56 y 365 días de almacenamiento.
- El D_{30} incrementa su valor desde $1,7 \times 10^{-2}$ mm a 2×10^{-2} mm al cabo de 56 días, acusando valores iguales a $2,6 \times 10^{-1}$ mm para la muestra con 365 días de almacenamiento.

- El D_{60} varía de $4,4 \times 10^{-2}$ mm a 0 días de almacenamiento a $9,5 \times 10^{-2}$ mm en la muestra de 56 días de curado, hasta adoptar valores de $3,8 \times 10^{-1}$ mm al cabo de 365 días.
- Las variaciones en la granulometría de la mezcla a lo largo del tiempo de curado producen cambios en la clasificación que le corresponde al material de acuerdo al Sistema de Clasificación Unificado de Suelos. Se corroboró que la cementación y uniones detectadas a nivel microscópico transforman a un suelo predominantemente fino en un suelo granular grueso (SP) al cabo de 365 días.

5 COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LIMO CON ESCORIAS SIDERÚRGICAS

5.1 INTRODUCCIÓN

En este Capítulo se describe y analiza el efecto de la adición de escoria siderúrgica en la estabilización de los limos loésicos de Córdoba a partir del análisis de la evolución del comportamiento mecánico de los mismos.

En la sección materiales y métodos se identificaron las principales características físico-químicas y geotécnicas de los materiales utilizados en este trabajo de investigación. En este apartado se analiza, en una primera instancia, la influencia de los desechos de acería que, añadidos en distintas proporciones, provocan cambios en la compactación de las muestras limo-escoria.

En una segunda instancia, se evalúa el efecto que provoca el fenómeno de cementación en las muestras a partir de ensayos de resistencia a la compresión simple. La hipótesis principal a analizar en esta sección es verificar que las reacciones de tipo puzolánico, que tienen lugar dentro de las mezclas compactadas, gobiernan el comportamiento mecánico de los suelos loésicos estabilizados con escorias de acería, afectando por ende la rigidización y resistencia de las probetas.

Por último, se analiza la influencia que presenta el envejecimiento de las muestras estabilizadas en la compresibilidad que manifiestan las mismas a partir de ensayos de compresión confinada.

5.2 INFLUENCIA EN LA CURVA DE COMPACTACIÓN DEL LIMO LOÉSSICO

La influencia de la adición de escorias de acería se evaluó a partir de muestras de limo compactadas con 0, 4, 8, 12, 16, 20 y 24% de SS. La preparación de las muestras y metodología de ensayo se describe en el Capítulo 3.

Los ensayos de compactación resultaron en curvas típicas de un suelo fino, como es el caso de los suelos loésicos de Córdoba, presentando un solo pico como muestra la Figura 5-1. Esta forma puede atribuirse a que el comportamiento en todos los casos se encuentra controlado principalmente por la matriz fina debido a la baja proporción de escorias utilizadas [Mozejko y Francisca, 2020].

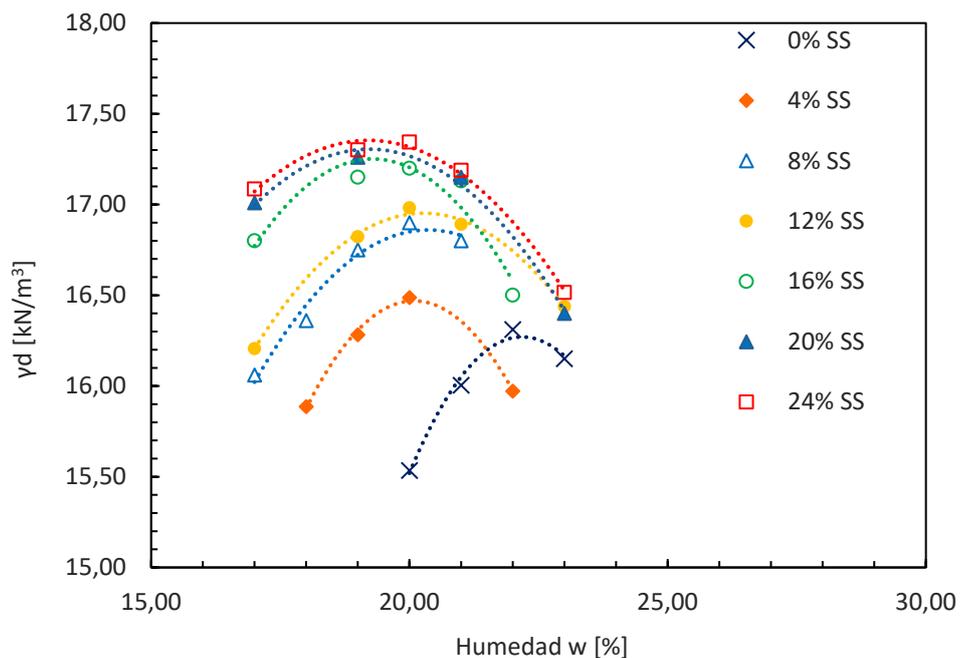


Figura 5-1 Influencia del contenido de escoria en la compactación de limo loésico.

A partir de los ensayos de compactación realizados es posible identificar que, en todos los casos, el peso unitario seco γ_d se incrementa a medida que el D_{50} de la mezcla aumenta. Esta observación, que se condice con reportes aportados por diversos autores, se encuentra relacionada a que el incremento de la proporción de escorias provoca un

aumento del peso unitario de las mezclas de suelo loésico compactado. El D_{50} de las partículas de escoria resulta mayor al de la matriz de limo loésico ($D_{50}=1,08$ y $0,03$ mm respectivamente) y, a su vez, la gravedad específica de la escoria respecto al limo es mayor ($G_s= 3,16$ y $2,64$ respectivamente). Ambos factores resultan responsables del incremento en el peso unitario seco de las mezclas. De igual manera, la adición de escoria genera una disminución en la humedad óptima de compactación. Este fenómeno se encuentra vinculado, por un lado, al cambio en la granulometría de la mezcla y, por otro, a la textura que presentan las escorias.

En la Tabla 5-1 se muestran los parámetros representativos de cada una de las mezclas ensayadas, en función del peso unitario seco máximo y la humedad óptima de compactación. Se observa que las muestras con escorias alcanzaron un peso unitario seco aproximadamente un 10% mayor al del limo puro.

Tabla 5-1 Parámetros de compactación mezclas L-SS.

Contenido de SS [%]	$W_{\text{ópt}}$ [%]	γ_d máx. [kN/m ³]
0	22,00	15,80
4	20,50	16,50
8	20,00	16,80
12	20,00	17,00
16	19,50	17,20
20	19,00	17,30
24	19,00	17,40

5.3 COMPORTAMIENTO TENSO-DEFORMACIONAL EN COMPRESIÓN SIMPLE DE MUESTRAS ESTABILIZADAS

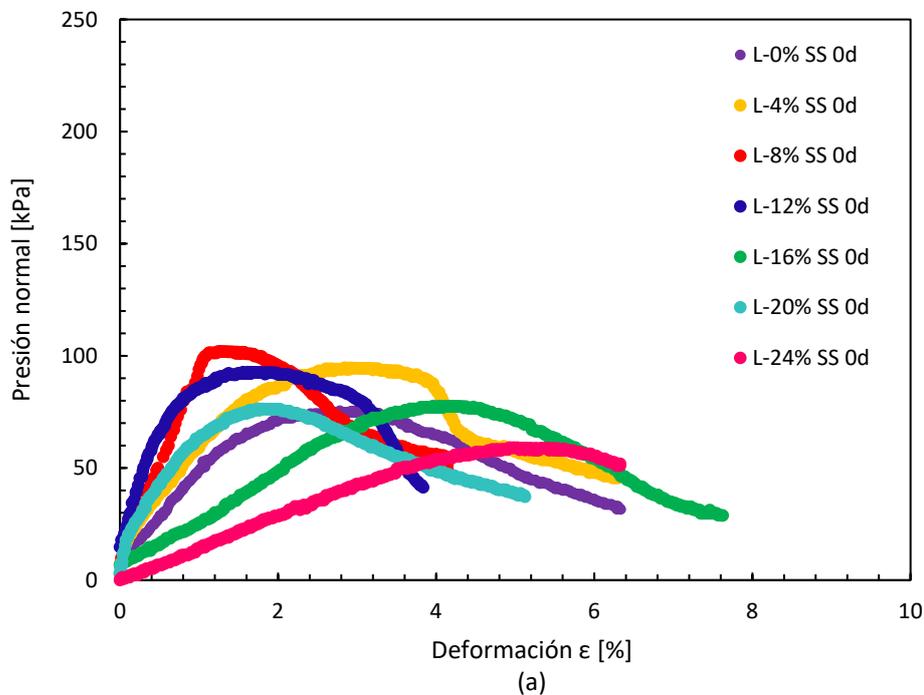
La evaluación de la influencia de los cambios evidenciados a nivel micro escala en las propiedades tenso deformacionales de mezclas limo-escoria se realizó a partir de ensayos de resistencia a la compresión simple. El objetivo es lograr identificar y cuantificar posibles cambios de resistencias y rigidez asociados a la formación de

hidrogeles y cementación de partículas identificados en las Figuras 4.7, 4.11, 4.13 y 4.14 presentes en el Capítulo 4.

5.3.1 Influencia del contenido de escoria

Con el objetivo de evaluar el efecto de las escorias y reacciones puzolánicas favorecidas por las mismas se ensayaron muestras de limo compactado con 0, 4, 8, 12, 16, 20 y 24% de escorias a 0 y 7 días de curado.

La Figura 5-2 presenta las curvas tensión-deformación obtenidas para cada una de las muestras ensayadas inmediatamente luego de ser compactadas (a) y luego de 7 días de curado (b). Dentro de las mezclas analizadas, la muestra L-12% SS es la que presenta mayor variación en su comportamiento aumentando su resistencia máxima y rigidizando su comportamiento. De manera similar, es posible identificar que la muestras L-24% SS es la que manifiesta menores variaciones de resistencia máxima junto con la muestra L-0% SS.



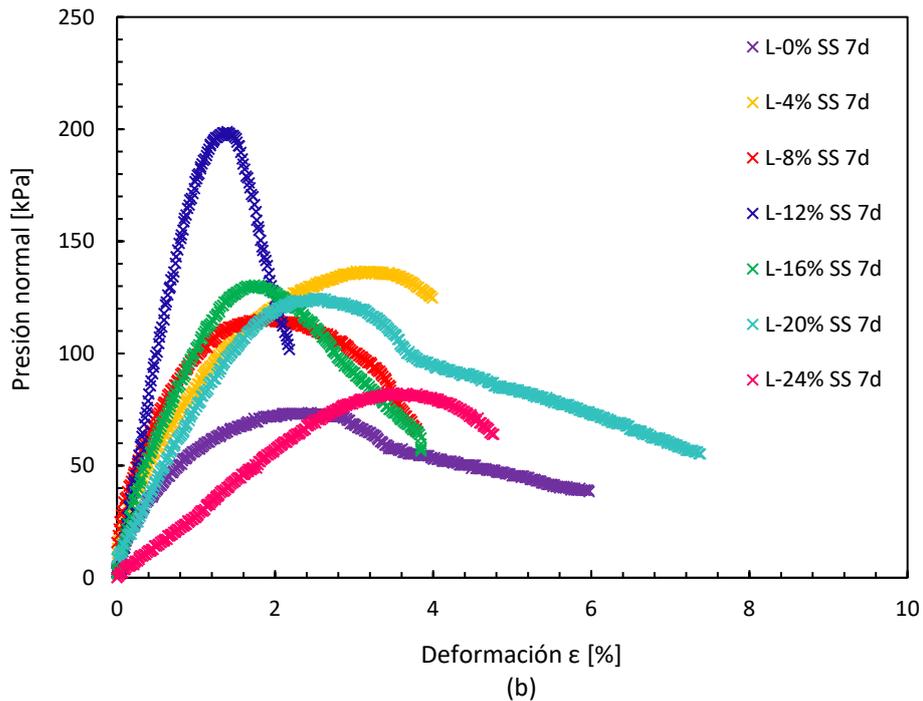


Figura 5-2 Influencia de la adición de SS sobre el comportamiento mecánico de muestras compactadas a 0 días (a) y 7 días (b) de almacenamiento.

La Figura 5-3 muestra los resultados obtenidos en términos resistencias máximas alcanzadas en función del contenido de escorias. A partir de los mismos se observa, en todos los casos, que las muestras estabilizadas con escorias presentan incrementos en la resistencia máxima a los 7 días de curado [Mozejko y Francisca, 2018]. Además, muestra que el limo sin escorias desarrolla cambios insignificantes en la RCS, alcanzando resistencias similares al momento del moldeo y luego de 7 días de almacenamiento. Este comportamiento se encuentra relacionado con la presencia de escorias en las muestras, quienes no solo provocan un mejor acomodamiento si no que estimulan el desarrollo de hidrogeles a partir de los mecanismos analizados en el Capítulo 4.

A partir de la Figura 5-2 y Figura 5-3 es posible establecer que:

- la muestra L-0% SS no manifiesta cambio significativo en su comportamiento mecánico, adquiriendo resistencias de 75 kPa aproximadamente, tanto al momento del moldeo como al cabo de 7 días de almacenamiento.

- La mayoría de las muestras con adiciones incrementan sus valores máximos alcanzados desde 90 kPa a 140 kPa al cabo de 7 días.
- El mayor valor de RCS lo desarrolló la muestra con 12% de escorias, logrando duplicar la resistencia máxima al cabo de 7 días de curado.

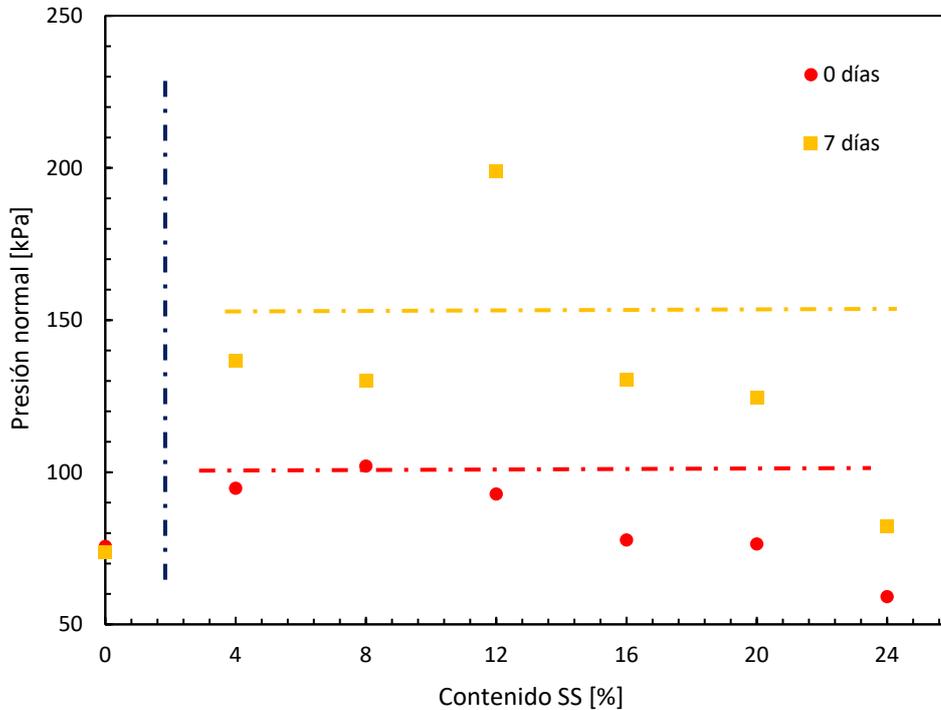


Figura 5-3 Influencia del contenido de escorias en la RCS de mezclas de limo compactado. la línea azul indica la diferencia entre las probetas sin adiciones del resto de las muestras. La línea roja indica la máxima RCS alcanzada por las muestras a 0 días de almacenamiento. La línea amarilla indica el incremento aproximado de resistencia al cabo de 7 días.

Considerando que el rango analizado (7 días), es un periodo corto de tiempo, se desprecian los efectos de envejecimiento de las probetas. Estos resultados indicarían que al compactar el limo con 12% de adiciones se logra un mejor acomodamiento estructural favoreciendo que ocurran interacciones entre las partículas de limo y las adiciones de escoria siderúrgica. Las dispersiones registradas para contenidos de escoria diversos al óptimo identificado podría deberse a que, en esta investigación, se decidió utilizar la fracción granulométrica completa de estos residuos de acería. Esto genera que las mezclas presenten variación en su composición, lo cual incide en los parámetros mecánicos obtenidos.

5.3.2 Influencia del tiempo de curado sobre la RCS

La influencia del envejecimiento se evaluó en mezclas compactadas de limo con 0, 12 y 24% de escorias (L-0% SS, L-12%SS y L-24% SS, respectivamente). Para ello se realizaron ensayos de resistencia a la compresión simple luego de 0, 7, 28 y 56 días de almacenamiento.

La Figura 5-4 y Figura 5-5 (a y b) presentan las curvas tensión-deformación, obtenidas para muestras de L-0% SS, L-12% SS y L-24% SS, ensayadas a diferentes periodos de almacenamiento. En el caso del limo puro (Figura 5-4) no se observan cambios en el módulo de deformación (E), siendo que a medida que la muestra envejece el mismo permanece constante. Sin embargo, se observó un ligero incremento en los valores de RCS, el cual se atribuye, en este trabajo a procesos de envejecimiento que sufre la muestra [Mozejko y Francisca, 2020]. Estos procesos se vinculan a ligeros procesos de cementación que ocurren en el tiempo debido al carácter puzolánico del limo. Sin embargo, al no haber sido incentivado con la alcalinización del medio la cementación ocurre de manera parcial y diferida en el tiempo.

En el caso de las muestras con 12 y 24% de escorias (Figura 5-5) el envejecimiento produce en ambos casos un marcado incremento en la rigidez y en la RCS de las muestras ensayadas. Dichos incrementos se encuentran vinculados al desarrollo de reacciones puzolánicas que ocurren producto de la interacción entre partículas de limo y escoria. La diferencia fundamental entre muestras estabilizadas y no estabilizadas radica entonces pura y exclusivamente, en el ambiente alcalino que proporciona al medio la adición de escoria, lo cual favorece el desarrollo de este tipo de reacciones.

Es importante destacar que la muestra sin escorias (L-0% SS) duplica su resistencia máxima al cabo de 56 días de almacenamiento, mientras que la muestra estabilizada con 12% SS logra duplicar su resistencia al cabo de 7 días de almacenamiento, alcanzando una resistencia incluso 5 veces mayor al cabo de 56 días. Si bien la resistencia alcanzada al cabo de 56 días en la muestra estabilizada con 24% de escorias resulta levemente inferior a la de 12%, la tendencia a un aumento de rigidez y resistencia

evidencia la importancia de la presencia de escorias y las reacciones que estimulan las mismas.

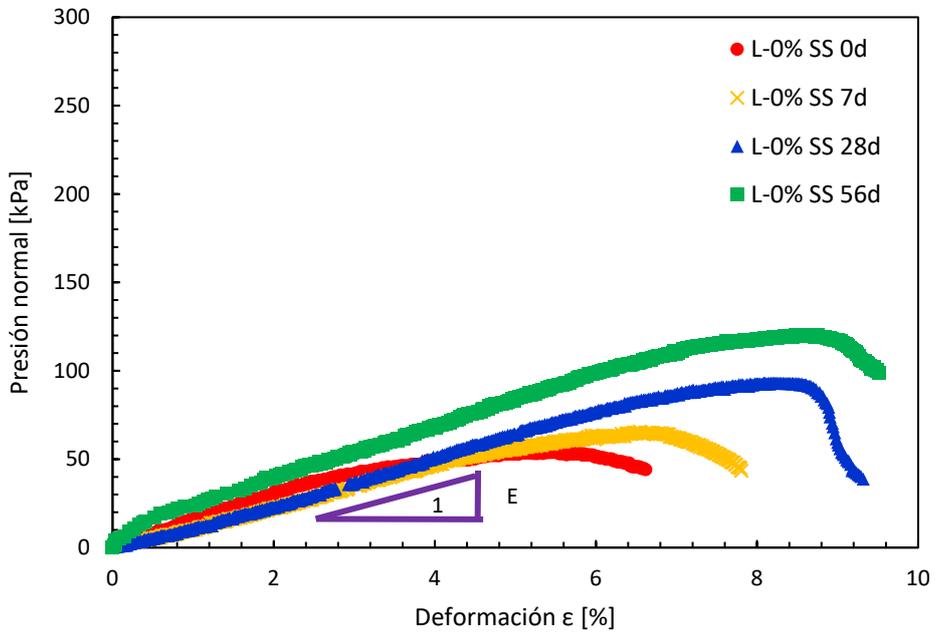
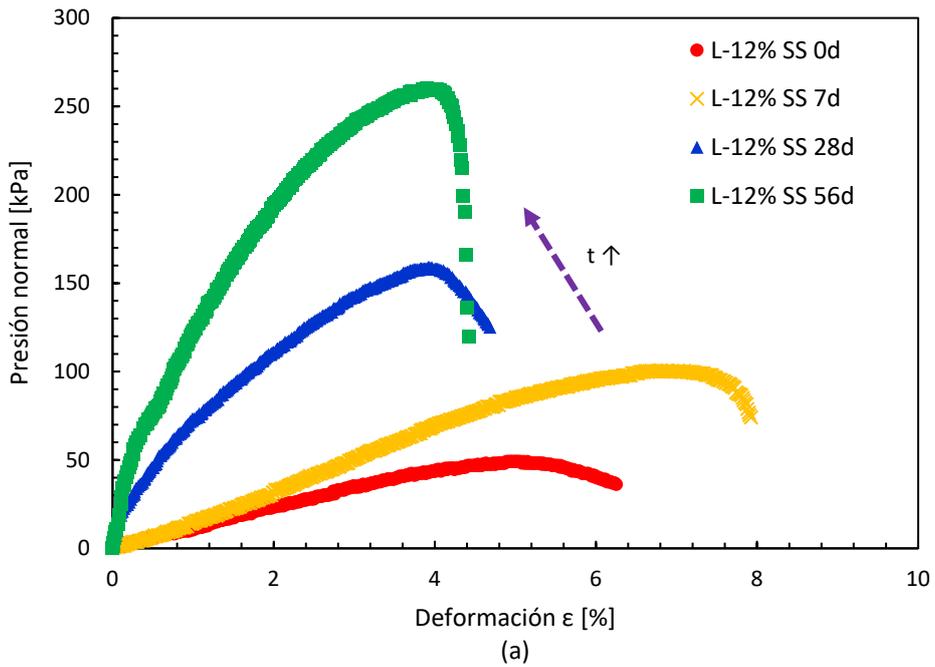


Figura 5-4 Influencia del periodo de almacenamiento en muestras de limo compactado.



(a)

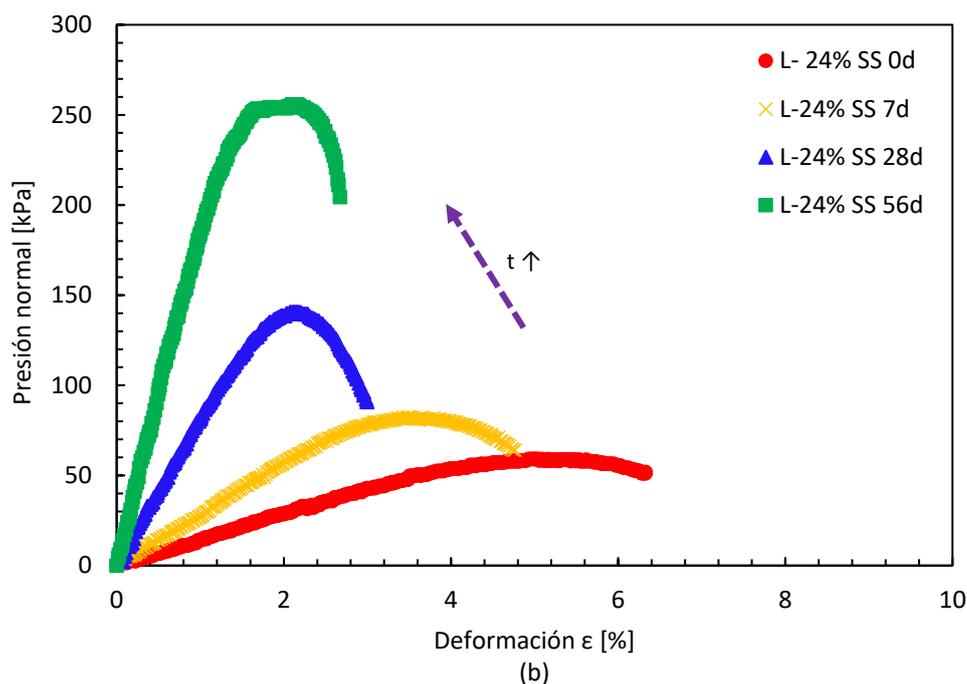


Figura 5-5 Desarrollo de reacciones puzolánicas medido a partir de ensayos en resistencia a la compresión simple-RCS – en muestras a 0, 7, 28 y 56 días de almacenamiento L-24% SS.

La Tabla 5-2 presenta una síntesis de los valores característicos obtenidos a partir de las muestras ensayadas cuyas curvas tensión-deformación se presentaron en la Figura 5-4 y Figura 5-5. La misma presenta la deformación para la cual se obtiene el pico de resistencia, junto con los módulos de deformación al 50% de la resistencia máxima (E_{50}) y máximo ($E_{máx}$). Las muestras de limo arrojaron valores que oscilan entre 1,22 y 1,38 MPa, a la vez que la muestra presenta siempre un comportamiento dúctil. En cambio, las muestras con escoria tienden a comportarse como un material frágil, alcanzando mayores resistencias, pero a menores deformaciones. Esto se traduce a incrementos en los módulos de deformación obtenidos para las muestras estabilizadas a medida que aumenta el periodo de almacenamiento.

En la Tabla 5-2 se muestran a su vez, los valores de resistencia y deformación alcanzados en la muestra L-12% SS al cabo de 365 días de almacenamiento, a fin de comparar resultados obtenidos en las muestras analizadas previamente al cabo de 7, 28 y 56 días de almacenamiento. La curva tensión-deformación correspondiente a la muestra con 365 de curado se muestra en el Anexo I.

Los resultados obtenidos permitieron detectar que los valores de resistencia alcanzados al cabo de 1 año de curado superan los valores de muestras limo estabilizado con cemento luego de 28 días de almacenamiento. De acuerdo a Costantini y colaboradores [Costantini et al., 2021], las muestras estabilizadas con cemento incrementan sus valores de resistencia a mayor contenido de cemento y periodo de curado. Mezclas L-3% cemento arrojaron valores de 560 kPa al cabo de 28 días, mientras que la mezcla L-12% SS acusó resistencias de 734 kPa al cabo de 365 días de almacenamiento.

El cambio detectado en las curvas tensión-deformación de las mezclas estabilizadas se condice con un material cuyo comportamiento se encuentra gobernado por procesos de cementación, en los cuales se produce tanto un incremento de resistencia como de rigidez. En este caso, la cementación que gobierna el comportamiento es la reacción puzolánica que desarrolla hidrogeles que ocupan los poros inicialmente vacíos, aumentando el contacto y la cementación entre partículas evidenciado en el Capítulo 4.

Tabla 5-2 Propiedades de las mezclas analizadas en RCS.

L-0% SS				
t [días]	ϵ [%]	RCS máx. [kPa]	E máx. [MPa]	E50 [MPa]
0	5,47	54,71	1,00	1,22
7	6,54	65,63	1,00	1,27
28	5,47	93,18	1,70	1,38
56	8,08	120,30	1,49	1,24
L-12% SS				
t [días]	ϵ [%]	RCS máx. [kPa]	E máx. [MPa]	E50 [MPa]
0	4,89	49,15	1,01	0,73
7	6,80	100,83	1,48	1,87
28	3,92	159,02	4,06	4,42
56	3,91	260,02	6,66	8,32
365	1,58	734,25	46,44	53,18
L-24% SS				
t [días]	ϵ [%]	RCS máx. [kPa]	E máx. [MPa]	E50 [MPa]
0	4,93	59,07	1,20	1,40
7	3,43	82,31	2,40	3,15
28	2,18	140,63	6,45	8,76
56	1,92	255,73	13,32	14,69

La diferencia que se puede detectar, tanto en los módulos de deformación como de resistencia alcanzada, en mezclas L-12% SS y mezclas L-24% SS radica en la proporción de material granular añadido. En primer lugar, cabe esperar que a mayor proporción de escorias se desarrollen mejores condiciones para que las reacciones puzolánicas ocurran dado que las mismas generan el ambiente propicio para que evolucione la formación de hidrogeles en las mezclas compactadas. Por este motivo, las diferencias obtenidas en los módulos de deformación (E_{50}) mostradas en la Tabla 5-2 entre muestras L-12% SS y L-24% SS, se encuentran vinculadas al mayor porcentaje de escorias que fomenta la evolución de reacciones puzolánicas cementando la muestra a la vez que rigidiza su comportamiento.

En segundo lugar y de manera conjunta, investigaciones previas sugieren el comportamiento de mezclas de materiales depende de procesos de segregación asociados a las diferencias de densidad, rigidez, forma y tamaño de las partículas que la componen. De acuerdo a diversos autores resulta necesario considerar la segregación en mezclas donde el contenido de inclusiones adopta valores próximos al 30% de la muestra. De esta manera, considerando que la mezcla L-24% SS se encuentra próxima a este contenido crítico de adiciones, se atribuye la diferencia en los valores máximos de resistencia a la compresión simple obtenidos con este fenómeno de segregación.

La muestra L-12% SS manifiesta un comportamiento de un suelo fino cementado debido a la presencia de SS. Las mismas mejoran con el tiempo sus propiedades mecánicas medidas en términos de resistencia, alcanzando valores de 260 kPa al cabo de 56 días de almacenamiento. En la muestra de L-24% SS estas mejoras comienzan a decrecer alcanzando valores de resistencia levemente inferiores (255 kPa) en el mismo periodo. Al aumentar el porcentaje de escoria, existe mayor número de partículas gruesas presentes en la mezcla, por lo que la relación de volumen entre la fracción del suelo y las partículas de escoria disminuye. Cantidades más altas de partículas gruesas resultan en un “peor” arreglo o acomodamiento de partículas, resultando contraproducente para el comportamiento mecánico de la muestra.

Debido a que el peso de las probetas tuvo variaciones insignificantes durante el curado los cambios en la resistencia a la compresión simple no pueden atribuirse a efectos producidos por cambios en el grado de saturación ni succión de las probetas. Por lo tanto, el aumento de resistencia en ambas probetas se atribuye en esta investigación a un proceso de envejecimiento en el caso de las muestras L-0% SS, mientras que el incremento observado en la resistencia a la compresión simple y en la rigidez en todas las mezclas compactadas L-SS a lo largo del periodo de curado se atribuye a procesos de cementación natural que ocurre debido a la interacción entre la escoria de acero y la fracción vítrea del limo arcilloso a través de reacciones puzolánicas [Mozejko y Francisca, 2020]. Esta interacción genera que las zonas de contacto entre partículas crezcan y como consecuencia que mejoren su comportamiento mecánico, soportando mayores tensiones.

Este fenómeno de cementación que ocurre entre las partículas continúa desarrollando reacciones puzolánicas a lo largo del tiempo. Esto queda manifestado en la muestra de 365 días, la cual incrementa 15 veces su valor de resistencia durante el transcurso del año, aumentando de manera conjunta el módulo de deformación $E_{máx}$ y E_{50} , que adoptan valores de 46 y 53 MPa respectivamente. El módulo de deformación $E_{máx}$ resulta 46 veces mayor a la muestra con 0 días de curado, y se magnifica 7 veces en comparación con el módulo obtenido en la muestra estabilizada con 56 días de almacenamiento.

5.3.3 Influencia del contenido de humedad de amasado

El efecto del contenido de humedad al momento de la preparación de las mezclas sobre el comportamiento mecánico de muestras estabilizadas fue analizado en probetas L-12% SS moldeadas en distintos puntos de la curva de compactación.

Para ello se confeccionaron cinco (5) probetas de L-12% SS con distintas humedades iniciales; dos muestras con humedades correspondientes a la rama seca, una en concordancia con el punto óptimo y dos muestras con humedades correspondientes a la rama húmeda de la curva de compactación. Las muestras con distintos contenidos de

agua de amasado fueron ensayadas a 0, 7 y 28 días de ser dispuestas en cámara húmeda bajo condiciones de temperatura y humedad controladas.

Los resultados obtenidos para 7 y 28 días de almacenamiento se muestran en la Figura 5-6. La misma permite identificar que, las muestras compactadas en el lado seco de la curva de compactación (contenido de humedad inferior al óptimo) mostraron un comportamiento frágil, mientras que las compactadas en el lado húmedo desarrollaron un comportamiento dúctil.

El comportamiento tenso deformacional de las muestras compactadas con diferentes contenidos de humedad muestra un comportamiento típico correspondiente a suelos cohesivos. Para una misma energía de compactación, a medida que se incrementa el contenido de agua de amasado, la fábrica de suelo tiende a orientarse de manera dispersa u orientada. En cambio, en la rama seca de la curva de compactación las partículas se orientan de manera aleatoria, generando una estructura floculada, presentado mayor resistencia y rigidez.

La tendencia general indica que es posible obtener valores de resistencia mayores para las muestras compactadas con menor contenido de humedad, a la vez que sobre la misma es posible detectar variaciones despreciables en el módulo de rigidez o deformación con el tiempo.

Si bien en todos los casos el incremento de resistencia en compresión simple se encuentra relacionado a procesos de cementación que ocurren entre las partículas, dicho fenómeno resulta más visible en muestras preparadas con $w \leq w_{\text{óptima}}$. La Tabla 5-3 resume los resultados característicos de cada muestra ensayada. Como puede observarse, para un mismo periodo de envejecimiento, las muestras con mayor contenido de humedad presentan menores valores de resistencia máxima alcanzados, a la vez que soportan mayores deformaciones mostrando comportamiento dúctil, mientras que, de manera similar, su módulo de deformación decrece.

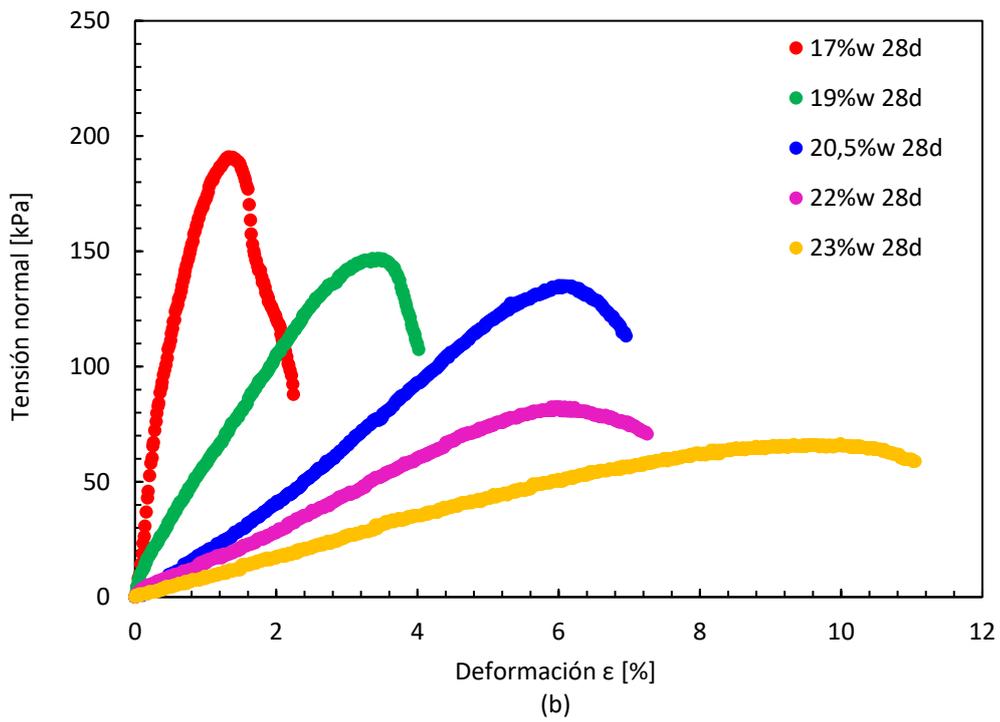
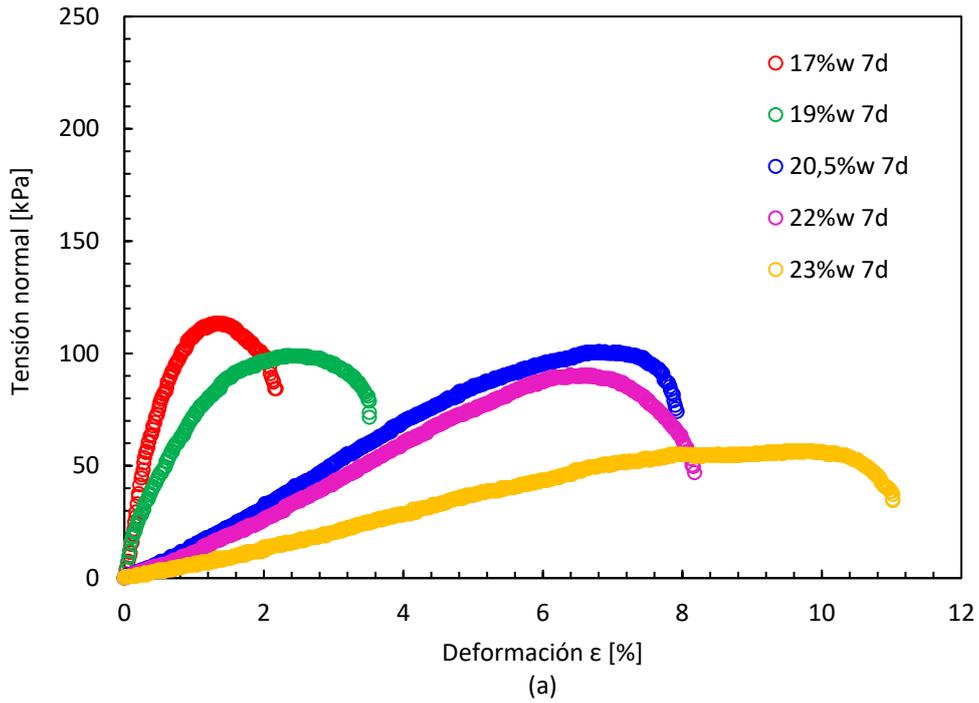


Figura 5-6 Comportamiento mecánico de muestras L-12% SS con diferentes contenidos de humedad (w); a) 7 días de curado, b) 28 días de curado.

Tabla 5-3 Resumen de características de muestras analizadas con distinta humedad inicial.

0 días			
w [%]	ε [%]	RCS máx. [kPa]	E50 [MPa]
17,00	1,63	113,01	13,16
19,00	3,39	85,19	4,01
20,50	4,89	49,15	0,84
22,00	7,97	48,76	0,75
23,00	8,81	39,45	0,55
7 días			
w [%]	ε [%]	RCS máx. [kPa]	E50 [MPa]
17,00	1,42	113,37	19,32
19,00	2,30	98,95	5,59
20,50	6,80	100,83	2,02
22,00	6,39	90,50	1,62
23,00	9,49	56,66	0,55
28 días			
w [%]	ε [%]	RCS máx. [kPa]	E50 [MPa]
17,00	1,32	190,86	24,18
19,00	3,36	146,85	4,65
20,50	6,00	135,06	2,69
22,00	5,90	82,43	1,35
23,00	9,99	66,47	0,48

Si bien no se observaron variaciones significativas de peso durante el curado, fue posible detectar leves diferencias en el contenido de humedad final de especímenes idénticos con distinta edad de envejecimiento. La Figura 5-7 presenta estas variaciones de peso y humedad que mostraron las muestras L-12% SS ensayadas en este apartado luego de los 0, 7 y 28 días de curado.

La disminución del contenido de humedad toma mayor relevancia a medida que aumenta el período de curado, mientras que se observan cambios insignificantes en la masa como muestra la Figura 5-7. Estos resultados indican que algunas moléculas de agua libre ya no se encuentran “disponibles” una vez que comienzan a ocurrir las reacciones puzolánicas. Estos pequeños cambios de humedad demuestran que el contenido volumétrico de agua se consume a lo largo del periodo de curado, aun a peso

constante, favoreciendo la formación de hidrogeles como resultado del proceso de cementación [Mozejko y Francisca, 2020].

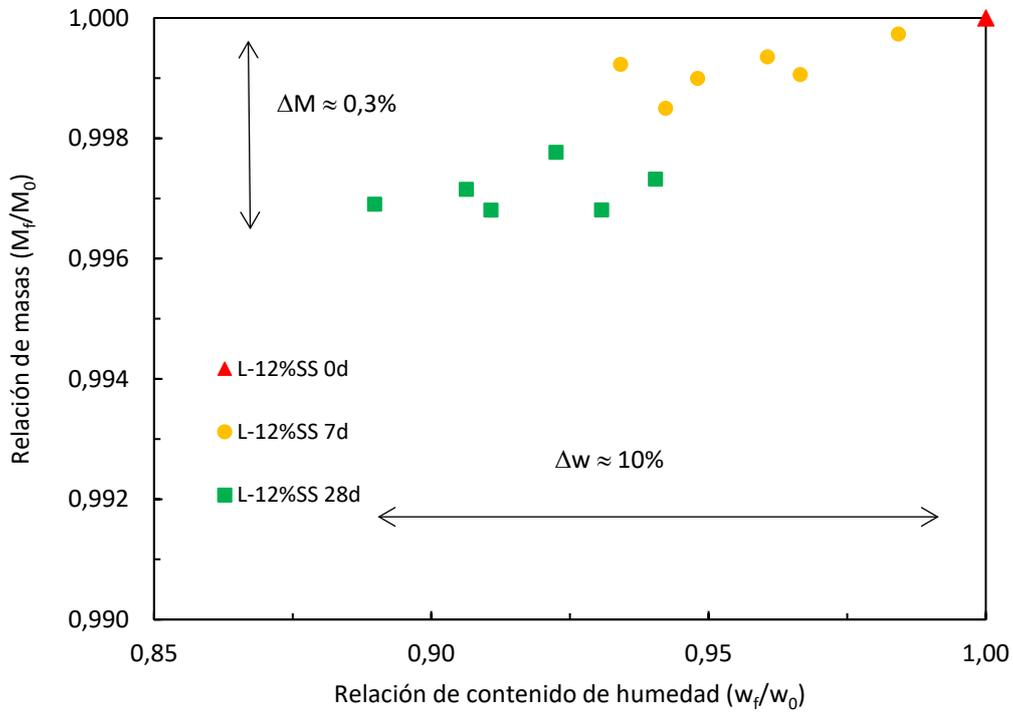


Figura 5-7 Variaciones en peso y humedad de muestras L-12% SS analizadas.

De esta forma, cuando se trabaja sobre la rama seca (y con la humedad óptima de compactación) el agua de amasado es rápidamente absorbida por la reacción puzolánica cambiando la estructura interna de la mezcla, por lo cual, el comportamiento mecánico representado en la Figura 5-6 se encuentra gobernado por procesos de cementación. En cambio, cuando se trabaja sobre la rama húmeda de la curva de compactación, el agua de amasado “libre” excede la capacidad de la reacción, por lo cual el comportamiento de la mezcla se encuentra gobernado, en el corto plazo, por la matriz de suelo saturado y no por procesos de cementación.

5.4 COMPORTAMIENTO TENSO-DEFORMACIONAL EN COMPRESIÓN CONFINADA DE MUESTRAS ESTABILIZADAS

A partir de los resultados obtenidos en el apartado anterior, y notando que las mezclas con 12% de escoria alcanzan mayores resistencias, se decidió trabajar sobre la misma analizando la evolución en la compresibilidad a lo largo del periodo de curado, a 0, 7, 28, 56 y 365 días. Las mezclas se prepararon siguiendo los lineamientos descritos previamente en la sección de Materiales y Métodos (Capítulo 3). Sobre estas muestras se evaluó la influencia del líquido de saturación con el objeto de identificar posibles efectos nocivos asociados a la compatibilidad química.

La Figura 5-8 muestra los resultados de las curvas de compresibilidad obtenidas a partir de los ensayos realizados sobre muestras compactadas al 80% de la energía de compactación. Muestras gemelas fueron inundadas con agua destilada (a) y con lixiviado (b). Si bien todas las muestras presentaron una relación de vacíos inicial similar, ($e_0 = 0,93 \pm 0,1$), con el objetivo de visualizar con mayor facilidad el proceso de rigidización que ocurre en las muestras, el eje semilogarítmico del gráfico presenta su valor inicial $x= 10$.

Los resultados expuestos en la Figura 5-8 (a y b) permiten observar que existe un comportamiento mecánico similar en términos de compresibilidad. Los cambios de relación de vacíos con el incremento de presión resultan indiferentes al fluido intersticial ya que, tanto muestras inundadas con agua destilada [W] como con lixiviado [LL], mostraron un comportamiento mecánico prácticamente idéntico. Esta tendencia indica que el efecto de las reacciones entre el suelo y la escoria no sufren degradación alguna debido a la presencia de elementos químicos en altas concentraciones como los observados en el lixiviado de relleno sanitario en el período analizado.

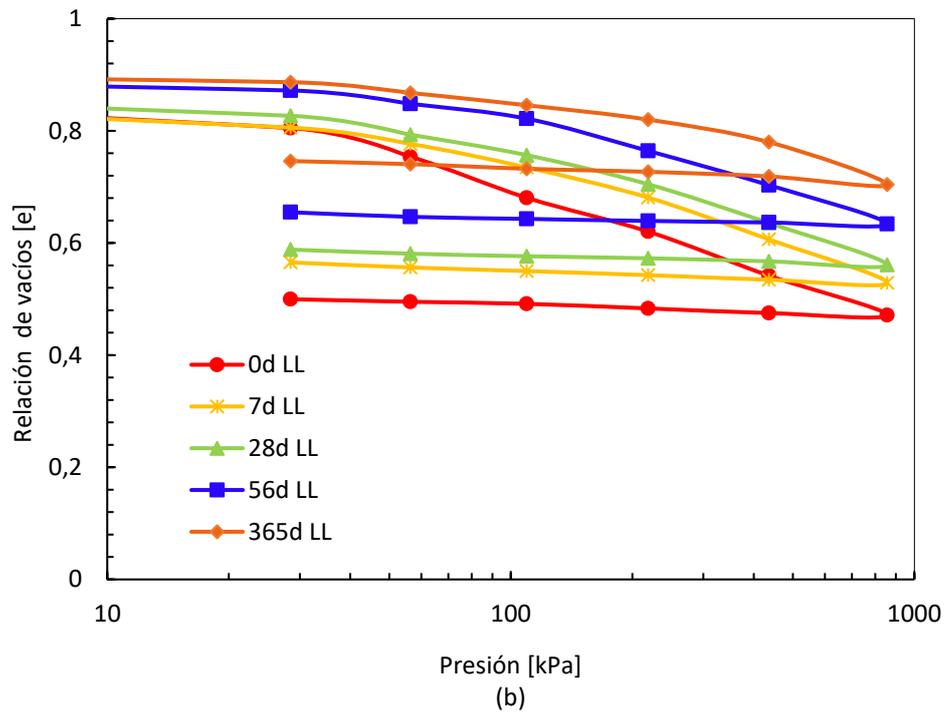
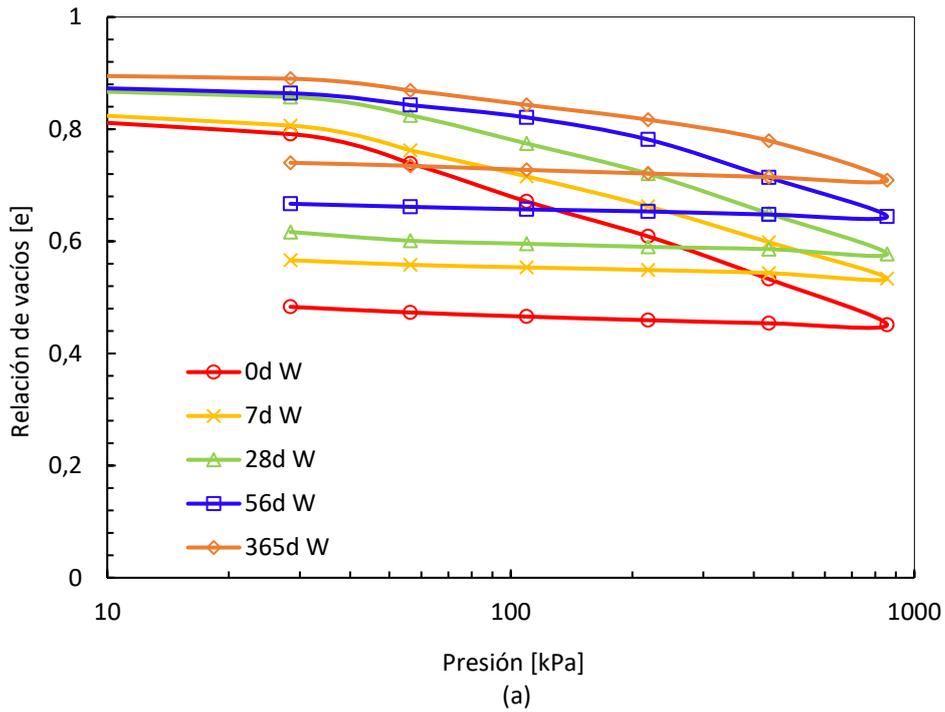


Figura 5-8 Influencia del tiempo de curado en la compresibilidad de muestras L-12% SS, permeadas con agua destilada (a) y lixiviado natural (b).

A su vez, la Figura 5-8, permite distinguir que existe una clara tendencia a la rigidización del suelo estabilizado a medida que el periodo de curado crece. Este proceso se traduce

en menores niveles de deformación para un mismo estado de carga aplicada, cuanto mayor sea el periodo de curado de la muestra. Esta última observación implica que, como los niveles de deformación alcanzados disminuyen, de acuerdo al ensayo edométrico la relación de vacíos a un determinado nivel de presión es mayor a medida que el periodo de curado se incrementa [Francisca y Mozejko, 2022].

A partir de las gráficas semilogarítmicas presentadas en la Figura 5-8, fue posible determinar el índice de compresión (C_c) junto con el módulo edométrico (E_M) para cada muestra. Debido a que no se detectaron cambios significativos en el comportamiento mecánico de las mismas al ser permeadas con distintos fluidos, la Tabla 5-4 presenta la variación de los coeficientes de compresibilidad y módulos edométricos con el tiempo de curado como promedio de los valores obtenidos para cada uno de los fluidos utilizados. Estos resultados permiten cuantificar el nivel de rigidización que ocurre en las mezclas L-12% SS a medida que transcurre el periodo de almacenamiento. A su vez, mediante la representación de los resultados mostrados en la Figura 5-8 (a y b) en escala semi logarítmica se pudo determinar las presiones de fluencia (σ fluencia) para cada tiempo de curado.

La Tabla 5-4 resume las propiedades medias de compresibilidad obtenidas. A mayor tiempo de curado se incrementa la presión de fluencia. La muestra ensayada inmediatamente después de la preparación presenta una presión de fluencia de 60 kPa, alcanzando valores de 65, 75, 105 y 190 kPa al cabo de 7, 28, 56 y 365 días de almacenamiento, respectivamente. Además, a mayor periodo de almacenamiento mayor resultó el módulo edométrico. Este aumento de rigidez es consistente con las tendencias obtenidas en ensayos de resistencia a la compresión simple, y se atribuyen en esta Tesis al desarrollo de reacciones puzolánicas.

A partir del ensayo edométrico se pudo determinar que, por cada aumento de carga, los cambios en la proporción de vacíos se vuelven menos importantes con tiempos de curado más largos, dado que el crecimiento del producto hidratado dentro de los poros de loess favorece la densificación de la matriz del suelo compactado.

Tabla 5-4 Propiedades medias de compresibilidad de las muestras L-12% SS.

Tiempo [días]	Cc	EM [MPa]	σ fluencia [kPa]
0	0,24	7,31	60
7	0,20	8,86	65
28	0,19	8,89	75
56	0,17	10,10	105
365	0,13	13,05	190

La Figura 5-9 presenta los resultados de los ensayos edométricos en gráficos tensión-deformación (σ - ϵ) tanto de las muestras inundadas con agua destilada [W] (a) como con lixiviado [LL] (b). En esta manera de visualizar los resultados obtenidos se evidencia la importancia de la rigidización a lo largo del tiempo de curado. En los tramos de carga se observa que, para un mismo estado tensional, existen menores niveles de deformación a medida que la muestra envejece reduciendo aproximadamente 13% el nivel de deformación alcanzada al cabo de 365 días de almacenamiento. En cambio, las muestras presentan en los tramos de descarga un comportamiento similar entre ellas, con deformaciones permanentes independientes al estado tensional sometido [Mozejko y Francisca, 2021].

Tanto la Figura 5-8 como la Figura 5-9 permiten detectar que existe un comportamiento mecánico prácticamente idéntico cuando las muestras son inundadas con diversos fluidos, indicando que los procesos que gobiernan su respuesta están dados por las reacciones que existen entre el suelo y la escoria.

De esta manera, la evolución de las muestras a lo largo del periodo de almacenamiento se traduce a un mejor acomodamiento estructural, al incrementar el nivel de contacto entre partículas y los hidrogeles desarrollados por las reacciones puzolánicas. A partir de la formación de hidrogeles que vinculan las partículas de escoria con la matriz fina de limo a través de las reacciones puzolánicas se provoca que la carga se distribuya sobre un área de mayor uniformidad y con menores relaciones de vacíos, (observado a partir de los ensayos con microscopia confocal y SEM), lo cual genera disminuciones en los niveles de deformación que sufren las muestras sometidas a una misma carga con distinto nivel de envejecimiento.

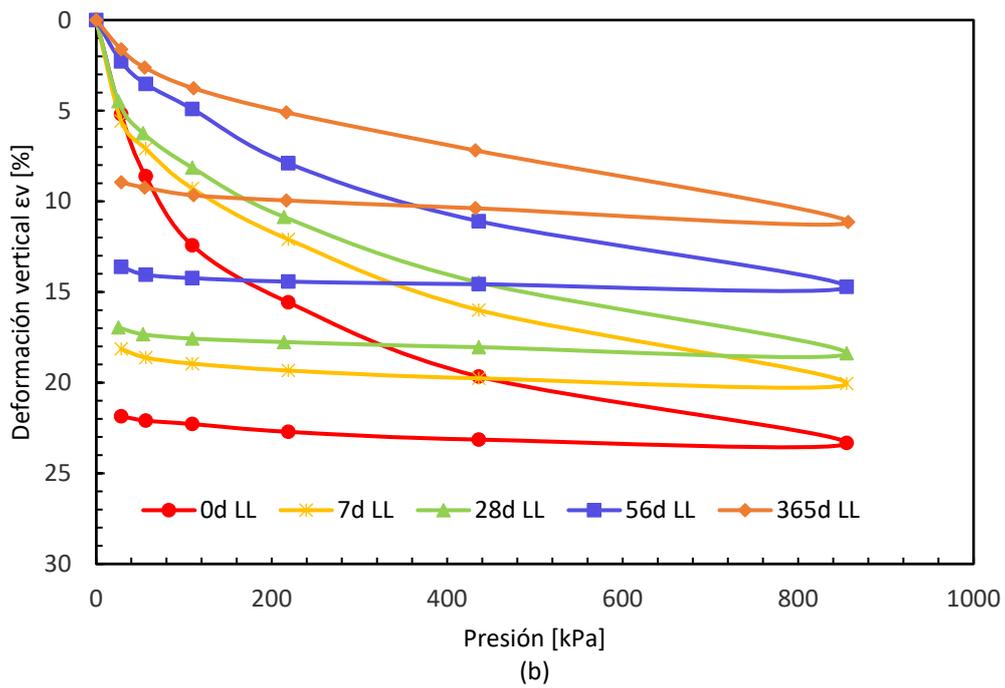
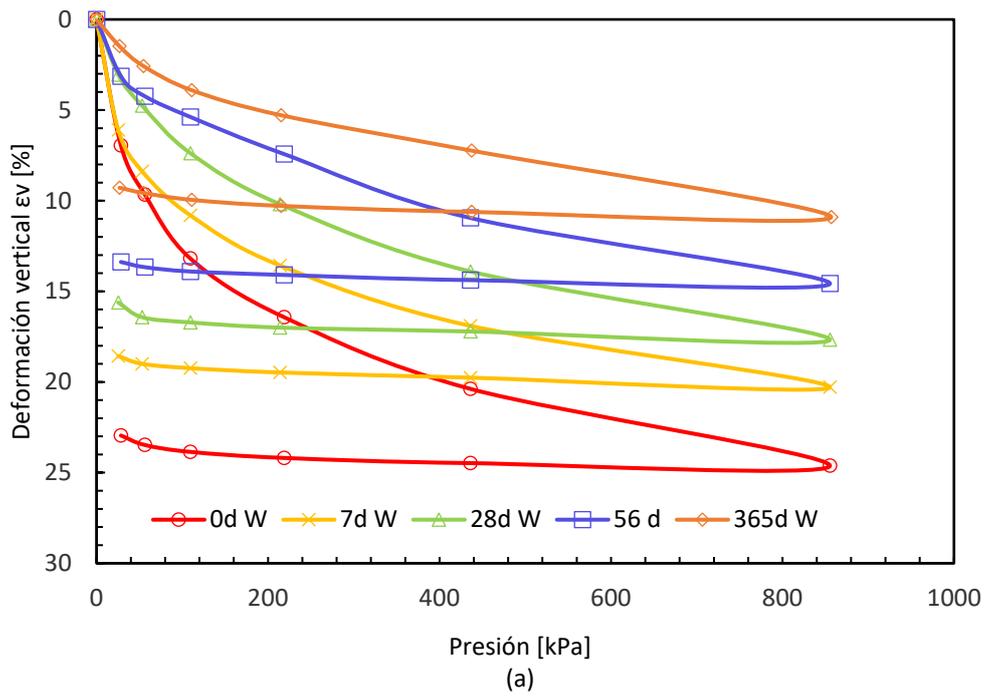


Figura 5-9 Influencia del tiempo de curado en la deformación de muestras L-12% SS, permeados con agua destilada (a) y lixiviado natural (b).

5.5 PRINCIPALES APORTES DEL CAPÍTULO

A partir de los resultados obtenidos en este Capítulo fue posible vincular los efectos que generan las reacciones puzolánicas a nivel microscópico con el comportamiento mecánico (macroscópico) de los limos compactados y estabilizados con escorias siderúrgicas. En este marco, fue posible identificar en las muestras estabilizadas mejoras en los valores de resistencia alcanzados junto con mejoras en los módulos de deformación. Los resultados generados permitieron determinar que las mezclas de limo-escoria presentan un comportamiento mecánico típico de los suelos cementados. Este efecto se relacionaría con la cementación natural que sufrieron las muestras debido al desarrollo de reacciones puzolánicas. Se determinó que el desarrollo de los hidrogeles favorece la rigidización a lo largo del periodo de almacenamiento manifestando aumentos significativos en los módulos de deformación y en la presión de fluencia medidos en los ensayos de consolidación. Las principales conclusiones se resumen de la siguiente manera:

- ✓ La adición de escorias generó, en las mezclas estabilizadas de limo compactado, un incremento del peso unitario seco. Este incremento resultó en valores de γ_d que superan el peso unitario seco del limo puro aproximadamente un 10%.
- ✓ Se detectó una disminución en la humedad óptima de compactación en las mezclas con escorias. Esta disminución se encuentra vinculada a la textura y granulometría que presentan las escorias.
- ✓ A partir de la adición de escorias siderúrgicas se observaron mejoras en el comportamiento tenso-deformacional de suelo limoso de la provincia de Córdoba, resultado de procesos de cementación que ocurren entre las partículas.
- ✓ La presencia de adiciones de escorias en los limos compactados generó incrementos en la RCS los cuales resultan dependientes del almacenamiento o tiempo de curado de las muestras. A mayor tiempo de curado, mayor es la resistencia de las mismas.
 - El desarrollo de hidrogeles dentro de los espacios inicialmente vacíos en las muestras genera que la tensión se distribuya en el esqueleto de suelo de una manera más homogénea, ya que la densificación producida por los hidrogenes cementa partículas vecinas y aumenta el número de contactos

(o número de coordinación) entre partículas. Estos cambios resultan de mayor relevancia a medida que evolucionan las reacciones puzolánicas a mayor periodo de almacenamiento;

- Se detectó que las muestras estabilizadas con distinto porcentaje de escorias incrementan su resistencia con el período de almacenamiento. La resistencia del limo compactado al cabo de 28 días resultó en 93 kPa, siendo que la muestra estabilizada con 12% de escorias adoptó valores aproximados de 160 kPa. Este incremento se vio potenciado al cabo de 56 días, donde el limo estabilizado duplicó el valor de resistencia del limo compactado con la misma edad (120 kPa y 260 kPa respectivamente). Al cabo de 365 días de almacenamiento la muestra arrojó valores de resistencia 15 veces mayores adoptando una resistencia de 734 kPa. Los resultados generados corroboran el incremento significativo de resistencia, atribuido exclusivamente a la cementación natural de partículas relacionada con las reacciones puzolánicas.
- ✓ A medida que las muestras envejecen, los productos resultantes del proceso de cementación provocaron que las muestras sufran menores niveles de deformación mientras se rigidizan.
 - A los 0 días de almacenamiento el limo estabilizado soporta deformaciones del orden del 5%. Al cabo de 28 días de almacenamiento la mezcla estabilizada alcanza su resistencia máxima con un nivel de deformación de 3,92%. Al cabo de 365 días la tendencia de rigidización queda incluso más marcada, siendo que la mezcla alcanza el pico de resistencia para una deformación del orden de 1,58%.
 - Las deformaciones necesarias para alcanzar la resistencia máxima en condiciones no confinadas (RCS) se reducen un 70% al cabo de 365 días de curado, lo cual es una clara evidencia experimental del efecto de rigidización que provocan las escorias.
- ✓ Se detectó que la humedad de compactación influencia el comportamiento tenso-deformacional en las mezclas. El fenómeno de cementación resultó más visible en las muestras compactadas en la rama seca, con $w < w_{\text{óptimo}}$, las cuales manifestaron mayores valores de resistencia al cabo de 28 días de almacenamiento junto con un

comportamiento frágil. Todas las muestras preparadas con $w > w_{\text{óptimo}}$ soportaron mayores deformaciones, del orden del 6 y 8%.

- ✓ La rigidización de las muestras estabilizadas también se demostró a partir de ensayos edométricos en las mezclas de limo-escoria. Se corroboró que a medida que el periodo de curado crece, el suelo estabilizado manifiesta una clara tendencia a la rigidización.
 - A mayor periodo de almacenamiento se detectaron menores niveles de deformación para un mismo estado de carga aplicado. El nivel de deformación medido a la máxima presión ensayada (856 kPa) mostraron reducciones del orden del 4, 6, 10 y 13% al cabo de 7, 28, 56 y 365 días respectivamente.
 - Esta reducción de niveles de deformación para incrementos de esfuerzos en los suelos resulta compatible con el comportamiento esperado para suelos cementados, lo que se manifestó en menores coeficientes de compresibilidad (C_c) para mayores periodos de curado.
 - Se incrementó la presión de fluencia con el periodo de almacenamiento. Muestras con 0 días de almacenamiento manifestaron presiones de fluencia de 60 kPa aproximadamente. A mayor periodo de curado, las mezclas estabilizadas manifestaron mayores presiones de fluencia acusando valores de 75, 105 y 190 kPa para muestras con 28, 56 y 365 días de almacenamiento respectivamente.
 - A mayor periodo de almacenamiento, mayor resultó el módulo edométrico de las mezclas. El mismo se incrementó de 7,31 kPa para la muestra a 0 días hasta alcanzar valores de 13 kPa al cabo de 365 días de almacenamiento.
 - En todos los casos, a medida que la muestra se rigidizó acusó menor variación en la relación de vacíos de la mezcla.
- ✓ Se detectó que la formación de hidrogeles resulta en cambios permanentes en las muestras cementadas, resultando químicamente estables los productos de las reacciones puzolánicas.
 - Las muestras inundadas con agua destilada y con lixiviado natural, ensayadas en compresión confinada, manifestaron comportamientos

similares. Los cambios de relaciones de vacíos con el incremento de presión resultaron indiferentes al fluido intersticial.

- La presencia de elementos químicos en altas concentraciones, presentes en el lixiviado natural, no lograron degradar los hidrogeles formados por la reacción puzolánica en las muestras cementadas.

Los resultados obtenidos y mostrados en este Capítulo permiten corroborar la importancia de haber generado datos inéditos que demuestran el potencial de la utilización de escorias para estabilizar suelos limosos compactados. Las mejoras obtenidas, atribuidas al desarrollo de reacciones puzolánicas dentro de los poros del suelo resultan alentadores para considerar a las escorias como un material que permitiría una sustitución parcial de otros agentes cementantes menos amigables con el ambiente, o cuyo uso genera importantes emisiones de gases de efecto invernadero como es el caso del cemento Portland.

6 COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LIMO LOÉSSICO

COMPACTADO Y ESTABILIZADO

6.1 INTRODUCCIÓN

En este Capítulo se presenta un análisis experimental del comportamiento hidráulico de las mezclas de limo compactado con escorias. Para ello se seleccionó la muestra de limo con 12% de escoria (L-12% SS).

Se presentan y analizan resultados de ensayos de permeabilidad realizados en permeámetros de pared rígida. De manera complementaria se realizaron ensayos de permeabilidad en celdas edométricas con el objeto de evaluar la influencia del estado tensional sobre este parámetro. Estos ensayos buscan evaluar la influencia de los procesos de cementación en el comportamiento hidráulico-mecánico acoplado.

Los resultados se analizan con el objeto de identificar y cuantificar la influencia de los cambios microscópicos asociados a la generación de hidrogeles demostrada en el Capítulo 4, en las propiedades hidráulicas de las mezclas limo-escoria.

Por último, se presenta, a partir de la aplicación del modelo planteado por Kozeny-Carman, una aproximación que permite cuantificar el volumen de poros ocupados efectivamente por los hidrogeles de las reacciones puzolánicas, manifestado por el impedimento al flujo que generan los mismos.

6.2 INFLUENCIA DEL DESARROLLO DE HIDROGELES

El efecto que generan las reacciones puzolánicas en las muestras de limo loésico con adiciones de SS fue medido a partir de ensayos de permeabilidad a carga variable en muestras L-12% SS realizados a los 0 y 56 días de haber preparado la muestra. En la Figura 6-1 se presentan los resultados obtenidos para muestras que fueron permeadas

tanto con agua destilada [W] como con lixiviado natural [LL]. Las muestras ensayadas fueron compactadas al 90% de la densidad seca máxima obtenida en el ensayo de compactación. El bajo grado de compactación relativo se seleccionó con el propósito de ensayar muestras con una alta relación de vacíos inicial y, por tanto, mayor volumen de vacíos disponible para el desarrollo de hidrogeles.

La Figura 6-1 muestra la evolución de la conductividad hidráulica en función del tiempo. Se observa que el comportamiento hidráulico resulta indiferente al fluido permeante utilizado, siendo que tanto la muestra permeada con agua como con lixiviado natural manifestaron tendencias similares.

Por otro lado, la Figura 6-1 permite identificar una clara diferencia entre los resultados obtenidos para las muestras permeadas al momento de su preparación, con respecto a las muestras que fueron ensayadas luego de un curado de 56 días. Aquellas ensayadas a los 0 días manifestaron conductividades con valores aproximados de $1,23 \times 10^{-8}$ m/s, mientras que las muestras con 56 días de curado arrojaron conductividades hidráulicas cercanas a de $5,12 \times 10^{-9}$ m/s.

Considerando que no existen en este proceso condicionantes externos que pudieran modificar el comportamiento a lo largo del tiempo (como por ejemplo condiciones de cargas), la variación detectada en las muestras a 0 y 56 días de curado puede únicamente ser explicada mediante la obstrucción de los vacíos de la muestra. Esta obstrucción se asocia en la Tesis a los cambios microestructurales que ocurren durante la formación de hidrogeles, cuya evidencia se presentó en el Capítulo 4.

La densificación detectada en el Capítulo 4 modifica las propiedades mecánicas (Capítulo 5) y condiciona el comportamiento hidráulico. A medida que los hidrogeles ocupan los espacios vacíos, generan impedimento al flujo lo cual se traduce en disminuciones de un orden de magnitud, aproximadamente, en los valores de conductividad hidráulica medidos.

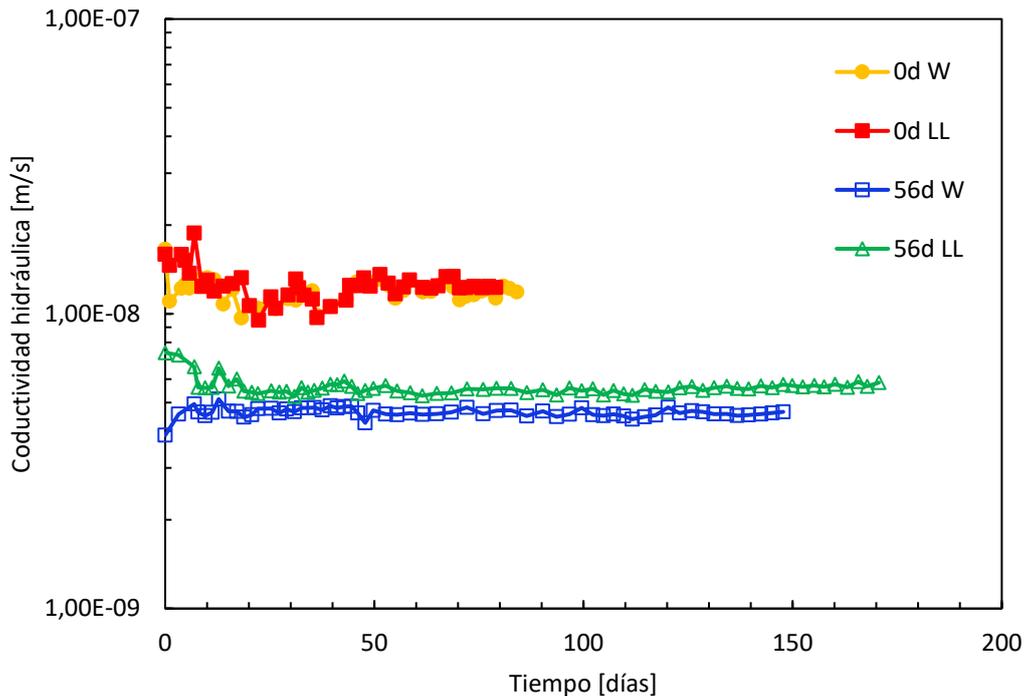


Figura 6-1 Conductividad hidráulica en función del tiempo en probetas L-12% SS a 0 y 56 días de curado utilizando agua destilada y lixiviado natural.

6.3 INFLUENCIA DEL DESARROLLO DE HIDROGELES EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO-HIDRÁULICO ACOPLADO

El proceso que genera impedimento al flujo a partir de reacciones puzolánicas que estimulan la formación de hidrogeles en las muestras fue a su vez medido en términos de conductividad hidráulica a partir de ensayos de permeabilidad acoplados en los ensayos edométricos. Los detalles del procedimiento experimental se presentan en el Capítulo 3: Materiales y Métodos.

En los ensayos se determinó la conductividad hidráulica en función de la presión vertical (Figura 6-2). La mezcla ensayada fue el limo con 12% de escoria, la cual fue permeada tanto con agua destilada (W) como con lixiviado natural (LL), Figura 6-2 (a) y (b) respectivamente. Como es posible observar, a medida que se incrementa la carga, la

conductividad hidráulica disminuye en todas las muestras ensayadas. Esta reducción se encuentra asociada con la disminución de la relación de vacíos de las muestras con los sucesivos saltos de carga del ensayo edométrico.

Sin embargo, y como deja ver la Figura 6-2, a medida que la muestra se rigidiza con el paso del tiempo (es decir con el aumento del periodo de almacenamiento), las muestras comienzan a mostrar comportamiento hidráulico que dependen tanto del estado tensional como del periodo de curado. Se demostró experimentalmente a través de ensayos edométricos que, a mayor periodo de curado, menor es el cambio de la relación de vacíos de la muestra. Entonces, en una primera instancia, a partir de los ensayos mecánicos este resultado tendería a indicar que para un mismo estado tensional y a medida que la muestra envejece los valores de conductividad hidráulica deberían ser cada vez más altos. Sin embargo, de acuerdo a los resultados de las mediciones de conductividad obtenidos es posible identificar que el mecanismo resulta inverso de lo esperado: a medida que la muestra envejece los valores de conductividad hidráulica disminuyen para un mismo estado tensional [Francisca y Mozejko, 2022].

De acuerdo a la Figura 6-2, las muestras con 7 días de curado mostraron cambios poco significativos. Sin embargo, las muestras con 28, 56 y 365 días de curado arrojaron conductividades hidráulicas muy inferiores. De esta manera la conductividad hidráulica que se obtiene en el estado tensional más alto (856 kPa), resultó en un orden de magnitud menor después de 28 días de curado, dos órdenes de magnitud menor después de 56 días de curado y 3 órdenes de magnitud menor a los 365 días. En este sentido, los cambios más significativos se observan a presiones más altas donde existe acoplamiento mecánico e hidráulico. El efecto acoplado se atribuye, por un lado, a la reducción de la relación de vacíos al aumentar la presión actuante, y por otro a la reducción de los vacíos disponibles para el flujo debido al desarrollo de hidrogeles.

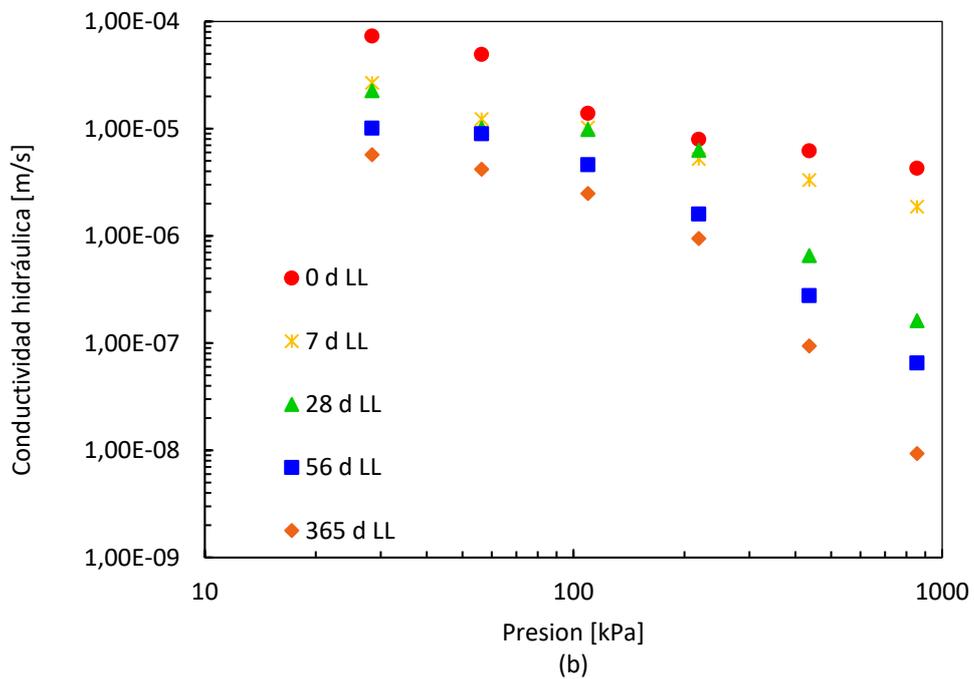
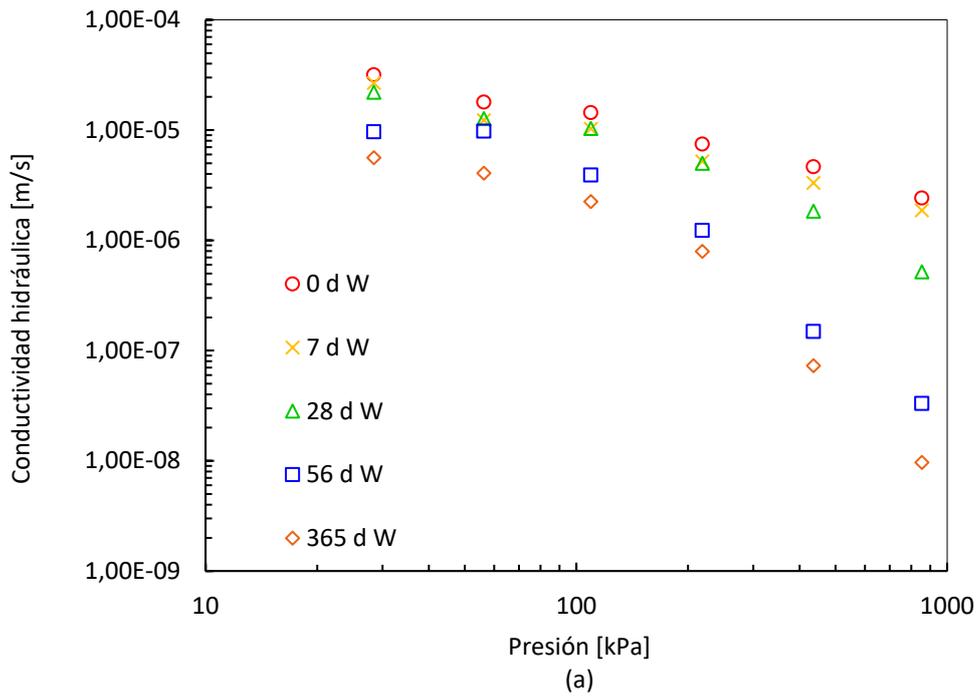


Figura 6-2 Influencia del tiempo de curado y presión actuante en el comportamiento hidráulico de muestras estabilizadas L-12% SS permeadas con agua destilada (a) y lixiviado natural (b).

Estos resultados se condicen con los resultados obtenidos a partir de análisis microscópicos, en donde fue posible identificar la reducción en los espacios inter-

partícula de las muestras a 0 y 56 días a partir de análisis microscópicos confocales (Capítulo 4). En este contexto, es posible vincular el desarrollo de estos hidrogeles con la reducción de deformación en las muestras medidas a partir de ensayos edométricos como así también la reducción en los valores de conductividad hidráulica en cuanto a que los hidrogeles se desarrollan dentro de los poros que inicialmente se encontraban “libres” representando de esta forma un impedimento al flujo del líquido permeante.

Además, a partir de las Figura 6-1 y Figura 6-2 se confirma que, si bien no fue posible identificar visualmente modificaciones en las muestras, todas ellas experimentaron cambios a nivel de microestructura durante el envejecimiento, afectando el comportamiento macroscópico emergente. La cementación de partículas da como resultado un esqueleto más rígido para el suelo compactado con escorias (Capítulo 4). Estos agentes cementantes tienen un módulo de elasticidad extremadamente alto en comparación con el suelo [Alizadeh et al., 2011; Hay et al., 2020] y, por lo tanto, tienden a rigidizar el esqueleto del suelo soldando partículas [Fernández y Santamarina, 2000]. A nivel macroscópico esto genera una estructura esquelética del suelo más rígida y menos compresible, pero que a pesar de tener “mayor” relación de vacíos la conductividad hidráulica se ve reducida.

6.3.1 Discusión de resultados: Aplicación de la ecuación de Kozeny – Carman para analizar cambios en la conductividad hidráulica

Con el objetivo de analizar y estudiar las variables que influyen sobre la conductividad hidráulica de las muestras se procedió a analizar el flujo a partir de la ecuación propuesta por Kozeny (1927) mejorada por Carman (1956) para estado de saturación 100%, que se expresa a continuación:

$$K = k_h \frac{\mu}{\gamma} = \frac{1}{k_o S_o^2 T^2} \frac{e^3}{(1+e)} \quad [6-1]$$

Donde “K” es la permeabilidad, “k_h” es la conductividad hidráulica, “γ” es el peso específico del fluido y “μ” la viscosidad del fluido, “k_o” es un factor de forma de los poros, “T” es un factor de tortuosidad que relaciona la longitud de la trayectoria real del flujo

y el espesor del estrato atravesado, “ S_0 ” es el área de superficie mojada por unidad de volumen de partículas y “ e ” la relación de vacíos.

Esta misma ecuación puede expresarse en función de un factor de forma de poro (C_s) relacionado con la tortuosidad y el área de superficie mojada en la forma:

$$C_s = \frac{1}{k_0 S_0^2 T^2} \quad [6-2]$$

Con lo cual la Ecuación 6-1 puede expresarse como:

$$K = k_h \frac{\mu}{\gamma} = C_s \frac{e^3}{(1+e)} \quad [6-3]$$

Las relaciones de vacíos de cada una de las muestras ensayadas y para cada estado tensional se obtiene de los ensayos de consolidación, cuyos resultados se mostraron en la Figura 5-8 del Capítulo 5. Los resultados experimentales mostraron que la variación en la relación de vacíos disminuye con el tiempo de curado. Esto se traduce, como se demostró en los aportes del Capítulo 5, en mayores relaciones de vacíos medidas para cada presión aplicada en tiempos de curado más largos.

Sin embargo, a pesar de estas determinaciones, la conductividad hidráulica mostró disminuciones significativas con el envejecimiento de las muestras para una misma condición de carga. Este fenómeno se encuentra asociado con productos de hidratación que tienden a llenar los poros inicialmente vacíos como resultado de reacciones puzolánicas. Este proceso naturalmente conduce a una reducción de la conductividad hidráulica ya que representa un obstáculo para el desplazamiento del líquido permeado, ya sea agua destilada o lixiviado natural, como se mostró en la Figura 6-2. Esta reducción en los volúmenes efectivos de poros que contribuyen al flujo del líquido resulta en una clara evidencia del fenómeno de obstrucción física, pero que necesariamente debe ser cuantificada.

La conductividad hidráulica de muestras L-12% SS saturadas en agua o lixiviado natural, mostró una buena dependencia lineal con la función de relación de vacíos teórica

revelada en la ecuación de Kozeny-Carman presentada, como se observa en la Figura 6-3. Estas tendencias confirman que los resultados obtenidos en esta investigación pueden ser representados con éxito por el modelo teórico de Kozeny-Carman presentado previamente. Comparando los resultados de la Figura 6-3 (a) y Figura 6-3 (b), la conductividad hidráulica y la función de relación de vacíos no se vio afectada significativamente por el líquido permeante. Sin embargo, en ambos casos se observan cambios marcados en las pendientes de las líneas de tendencia que relacionan la conductividad hidráulica con la función de relación de vacíos. Estos cambios están asociados a los diferentes períodos de curado (0, 7, 28, 56 y 365 días) [Francisca y Mozejko, 2022].

Considerando la validez de la Ecuación de Kozeny-Carman, y los resultados mostrados en la Figura 6-3, se determinó el factor de forma de los poros (C_s) a partir de la Ecuación 6-3. Los resultados obtenidos para el caso del agua como fluido permeante se presenta en la Figura 6-4. Diferencias despreciables se obtuvieron al realizar el mismo análisis para las muestras ensayadas con el lixiviado utilizado.

Los resultados de la Figura 6-4 muestran que el factor de forma determinado disminuye claramente con la presión aplicada. Es de esperar que la deformación de la muestra provoque cambios en la tortuosidad y, en consecuencia, sobre el factor C_s definido (Ecuación 6-2). Por tanto, a los 0 días de curado (al momento del moldeo), la dificultad de la movilidad del flujo se traduce en valores de conductividad hidráulica más baja a medida que se incrementan las cargas (Figura 6-2). Sin embargo, a medida que las muestras tienen mayor tiempo de curado se observa una reducción en el factor de forma C_s . Este resultado se atribuye al proceso de cementación identificado en el Capítulo 4, a partir de los cuales los hidrogeles generados tienden a ocupar los espacios inicialmente vacíos en las muestras reduciendo la porosidad efectiva de las mismas. A medida que esto se desarrolla, tanto " C_s " como " k " disminuyen por un fenómeno de colmatación física que dificulta la movilidad del líquido permeante en los poros libres de hidrogeles, produciendo cambios en la superficie específica y tortuosidad dentro de las muestras.

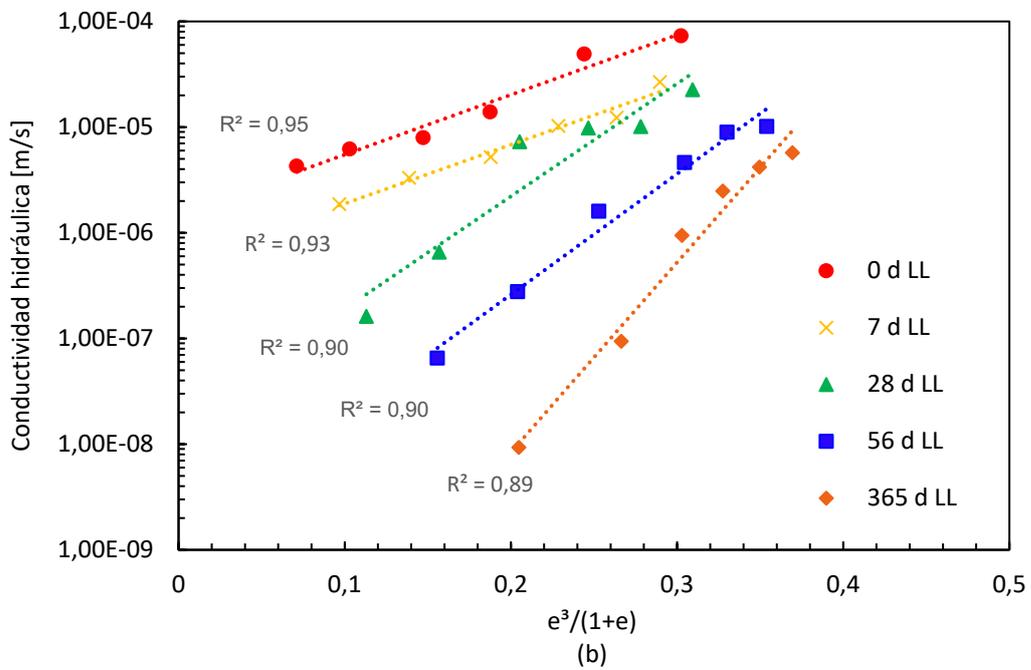
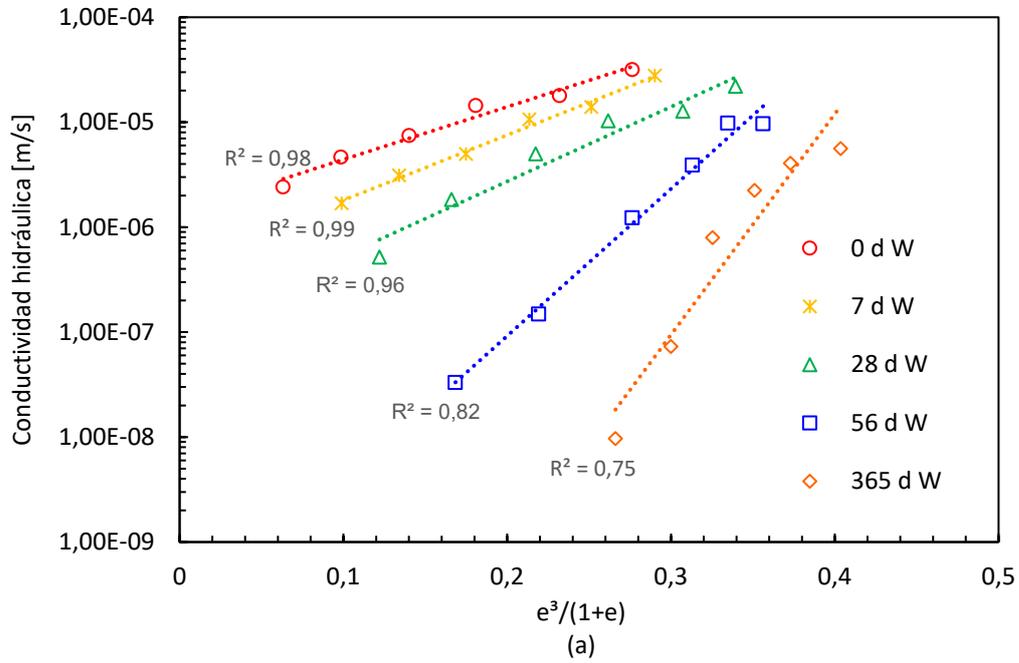


Figura 6-3 Función de relación de vacíos de Kozeny-Carman y relación de conductividad hidráulica para limo compactado con 12% SS con 0, 7, 28, 56 y 365 días de envejecimiento impregnado con agua destilada (a) y lixiviado natural (b).

Por otro lado, en la misma Figura 6-4 puede observarse que para condiciones de baja presión aplicada y diferente período de curado, la tasa de variación del factor de forma de poro C_s es independiente del tiempo de curado (la pendiente $\Delta C_s/\Delta \sigma \approx$ constante). Es posible inferir entonces que existe independencia del factor C_s de la condición de carga para presiones inferiores a 100 kPa, siendo los cambios detectados únicamente justificados por la formación del hidrogel. En cambio, una vez superados los 100 kPa, es posible visualizar la presencia de un mecanismo acoplado producto de la formación de hidrogeles y el proceso mecánico de reducción de vacíos (compresibilidad de las muestras).

A partir de la aplicación de la ecuación de Kozeny-Carman, cuando no ocurren todavía reacciones puzolánicas (0 días de curado), el 30% de la disminución en la conductividad hidráulica que ocurre debido al nivel de presión aplicado puede atribuirse a cambios en el factor de forma de poros C_s , sabiendo que:

$$\Delta C_s = \frac{C_{sf}}{C_{s0}} \quad [6-4]$$

Donde C_{sf} y C_{s0} son los factores de forma de los poros finales e iniciales de la muestra respectivamente.

En cambio, a medida que las muestras envejecen y se desarrollan reacciones puzolánicas dentro de los poros de la muestra, el comportamiento acoplado considerado se ve gobernado por cambios en la relación de vacíos. Esta afirmación se encuentra relacionada a que, según la estimación de la influencia del coeficiente de tortuosidad para la muestra de 365 días de almacenamiento, solo el 0,3% de los cambios medidos en la prueba de conductividad hidráulica pueden ser explicados por cambios considerados en el factor C_s . La información de cada muestra se presenta en el Anexo II, donde se puede corroborar que la relación entre los coeficientes de forma finales e iniciales disminuye a medida que la muestra envejece [Francisca y Mozejko, 2022].

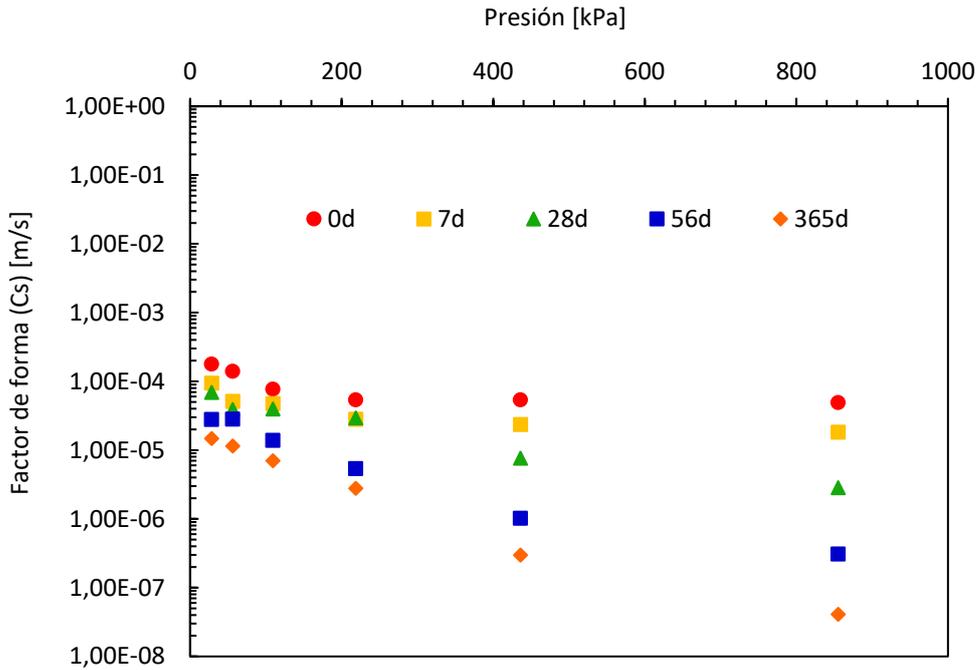


Figura 6-4 Factor de forma C_s de acuerdo al modelo Kozeny-Carman para las mezclas L-12% SS con envejecimiento de 0 a 365 días.

En este marco, de acuerdo con los resultados obtenidos de este análisis es posible corroborar que los cambios físicos, tales como las variaciones de tortuosidad, permitirían explicar cambios de a lo sumo un orden de magnitud de conductividad hidráulica en las muestras envejecidas ($C_s \leq 0,3\%$). Observando que la variación del factor C_s presenta influencia insignificante en las muestras envejecidas, y con el fin de determinar el efecto de los cambios en el volumen de los vacíos ocupados por hidrogeles, se consideran despreciables las variaciones de este factor de forma C_s . De esta manera, los cambios detectados en las mediciones de conductividad hidráulica quedarían explicados únicamente por la formación de los hidrogeles dentro de los poros y la evidente reducción de la porosidad efectiva.

En función de estas consideraciones es posible evaluar los cambios de conductividad hidráulica producidos por aumentos de presión y envejecimiento mediante la Ecuación 6-3, planteando los cambios de conductividad como una relación entre los valores medidos en la muestra con hidrogeles y sin hidrogeles de la siguiente manera:

$$kr = \frac{k_t}{k_0} = \frac{(1+e_0)}{(1+e_t)} \left(\frac{e_t}{e_0}\right)^3 \quad [6-5]$$

donde k_r es la relación de conductividad hidráulica a una presión aplicada dada, el subíndice "0" representa 0 días de curado y "t" representa 7, 28, 56 o 365 días de curado. La Ecuación 6-5 supone que las propiedades del líquido, la superficie específica y el factor de forma adimensional sufren cambios insignificantes ($\Delta Cs \approx 0$).

De esta manera es posible estimar la relación de vacíos que debería presentar la muestra en función de los valores de conductividad medidos, tomando como referencia la muestra ensayada inmediatamente después de su moldeo. En la misma, y al no existir tiempo suficiente para el desarrollo de reacciones puzolánicas, los valores de conductividad hidráulica se encuentran en concordancia con los valores de relación de vacíos determinados a partir del ensayo edométrico, considerando que solo existe un mecanismo mecánico que reduce la porosidad de la misma a medida que se incrementa la carga reduciendo, por tanto, la conductividad hidráulica.

A partir de la conductividad hidráulica y relación de vacíos de las muestras a los 0 días de curado, y a partir de la Ecuación 6-5 se obtuvo la variación *teórica* de la relación de vacíos que las muestras deben presentar en diferentes tiempos de envejecimiento para los valores de conductividad hidráulica medidos. La relación de vacíos reducida ($e_t = e_7, e_{28}, e_{56}$ o e_{365}) supone una cuantificación teórica de los vacíos que deberían presentar las muestras en función de la conductividad hidráulica medida a los 7, 28 56 y 365 días respectivamente. De esta manera, kr en la Ecuación 6-5 representa la relación entre la conductividad hidráulica medida en $t = 7, 28, 56$ o 365 días y las mediciones a los 0 días de curado. De esta forma, el volumen de hidrogeles que se desarrollan al llenar los poros, identificado como e_{hyd} , se puede expresar de la siguiente manera:

$$e_{hyd} = e_0 - e_t \quad [6-6]$$

La Figura 6-5 presenta los resultados obtenidos al aplicar la Ecuación 6-5 y Ecuación 6-6, que permiten cuantificar el desarrollo de hidrogeles en las muestras. Nuevamente, como no se manifestaron cambios en las muestras permeadas con agua destilada o

lixiviado, la figura presenta valores promedios de las relaciones de vacíos ocupadas por hidrogeles de ambas muestras. La Figura 6-5 muestra entonces el volumen de hidrogeles que ocupan los poros (e_{hyd}) para cada estado tensional o condición de carga, durante las pruebas de compresión confinada (para 0, 7, 28, 56 y 365 días de curado).

Como se puede observar, a los 0 días de curado no se identifica variación en la relación de vacíos medida y el valor teórico obtenido de la Ecuación 6-5. El volumen de hidrogeles aumenta con el periodo de almacenamiento y con la presión aplicada (Figura 6-5). A medida que aumenta la presión, para valores superiores a 100 kPa comienza a aumentar la influencia de la reducción de los vacíos considerados “libres” lo que magnifica la importancia relativa de la colmatación física que producen los hidrogeles.

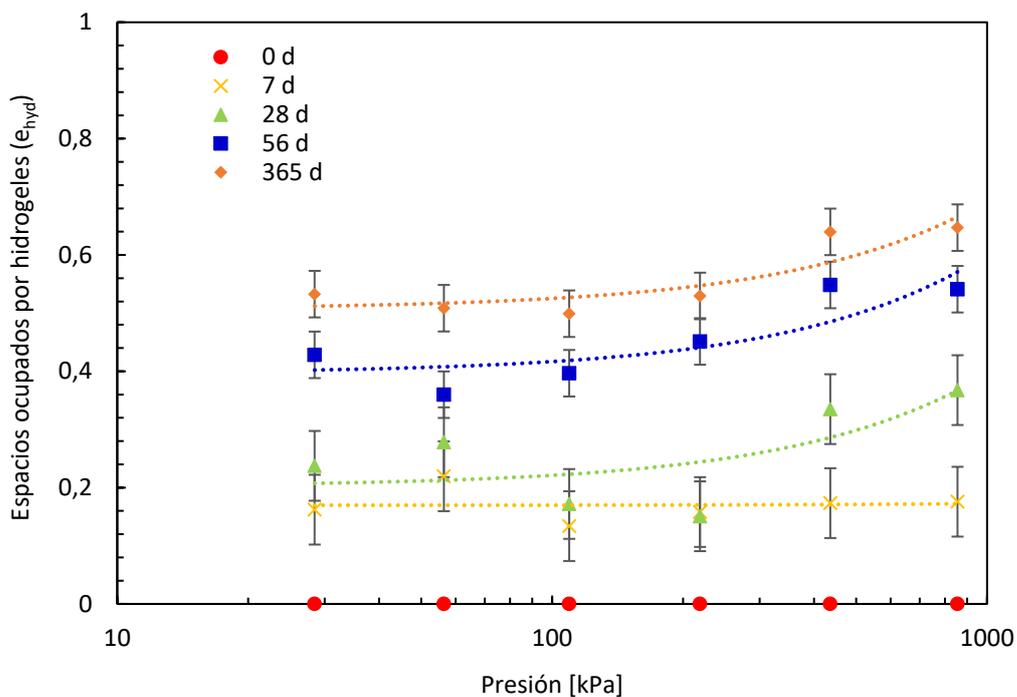


Figura 6-5 Espacios ocupados por hidrogeles según el cálculo adaptado de Kozeny-Carman.

A partir de la aplicación de la Ecuación 6-5, es posible determinar que la relación de vacíos que se encuentra *libre* y *disponible* para contribuir al flujo en las muestras disminuye con el envejecimiento. En este sentido, los valores menores de conductividades hidráulicas obtenidas e ilustradas en la Figura 6-2, se encuentran teóricamente relacionados con la disminución en los poros disponibles para el

desplazamiento de líquido y, por lo tanto, con una relación de vacíos efectiva reducida, debido a que la formación de hidrogeles que producen una estructura más densa.

Estas tendencias confirman que la formación de estos hidrogeles, debido al proceso de cementación evidenciado en el Capítulo 4, es responsable de las reducciones observadas en la conductividad hidráulica con el envejecimiento. Como la cementación es un proceso que depende del tiempo, el período de curado aumenta la formación de hidrogel. Este proceso de envejecimiento detectado tiende a crear una estructura más densa (Figura 4-7), que presenta una menor variación de la relación de vacíos con la presión y, por lo tanto, facilita la rigidez de la muestra [Francisca y Mozejko, 2022].

6.4 PRINCIPALES APORTES DEL CAPÍTULO

A partir de los resultados y discusión presentados en este Capítulo es posible concluir que la formación de hidrogeles juega un rol fundamental en el comportamiento hidráulico de las muestras de limo estabilizadas con escoria. Se generaron resultados experimentales inéditos a partir de los cuales se puede concluir lo siguiente:

- ✓ La generación de hidrogeles provoca cambios en las relaciones de vacíos de las muestras. Considerando únicamente el envejecimiento de las muestras, estos cambios se traducen en reducciones de un orden de magnitud en los valores de conductividad hidráulica medidos al cabo de 56 días de curado.
 - Se corroboró que la presencia de elementos químicos en altas concentraciones, presentes en un lixiviado natural, no lograron degradar los hidrogeles formados por la reacción puzolánica ni alterar la cementación natural de partículas. Incluso al estar en contacto con el hidrogel en prolongados periodos de tiempo, la conductividad hidráulica de todas las muestras se mantuvo constante independientemente de cuál sea el fluido permeante. Estos resultados corroboran que los cambios producidos pueden ser considerados permanentes.
 - Se detectó que la formación de productos de hidratación son los responsables de generar decrecimientos de un orden de magnitud en la

conductividad hidráulica de limos estabilizados. Las muestras analizadas con 0 días de curado arrojaron valores de conductividad medios de $1,22 \times 10^{-8}$ m/s, mientras que al cabo de 56 días de almacenamiento los valores de conductividad disminuyeron a $5,12 \times 10^{-9}$ m/s.

- ✓ El comportamiento hidráulico mostró dependencia tanto del estado tensional como del periodo de curado, resultando indiferente del fluido permeante. A partir de ensayos acoplados (ensayos edométricos con mediciones de conductividad hidráulica) se observó que las mezclas permeadas con agua destilada o lixiviado natural mostraron comportamientos similares.
 - Se identificó que, si bien a mayor periodo de curado el cambio en la relación de vacíos de la muestra es menor, a medida que la muestra envejece los valores de conductividad hidráulica disminuyen.
 - La conductividad hidráulica que se obtuvo para el estado tensional más alto aplicado (856 kPa) a los 0 días de almacenamiento arrojó valores medios de $3,35 \times 10^{-6}$ m/s. Los valores de conductividad de las muestras con mayor periodo de almacenamiento resultaron de uno, dos y tres órdenes de magnitud menor al cabo de 28, 56 y 365 días de curado respectivamente. Los valores medios de conductividad fueron $k_{28} = 3,40 \times 10^{-7}$, $k_{56} = 4,9 \times 10^{-8}$ y $k_{365} = 9,5 \times 10^{-9}$ m/s.
 - Se observó que a nivel macroscópico se genera una estructura esquelética más rígida y menos compresible, pero que a pesar de tener mayor relación de vacíos la conductividad hidráulica se ve reducida, lo cual resulta aparentemente contradictorio de acuerdo a las formulaciones teóricas y empíricas que relacionan la conductividad hidráulica con la relación de vacíos de una muestra.
- ✓ Se demostró que existe buena correspondencia entre los valores medidos y la ecuación de Kozeny-Carman, lo cual permitió determinar el efecto del factor de poros en los resultados obtenidos.
 - Se identificó que el factor de forma C_s disminuye con la presión aplicada en la muestra para un determinado periodo de curado, adoptando los siguientes valores para estados tensionales de 28 y 856 kPa respectivamente:

- Cs 0 días de curado: $1,78 \times 10^{-4}$ a $4,91 \times 10^{-5}$ [m/s]
- Cs 7 días de curado: $9,41 \times 10^{-5}$ a $1,82 \times 10^{-5}$ [m/s]
- Cs 28 días de curado: $6,89 \times 10^{-5}$ a $2,84 \times 10^{-6}$ [m/s]
- Cs 56 días de curado: $2,78 \times 10^{-5}$ a $3,07 \times 10^{-7}$ [m/s]
- Cs 365 días de curado: $1,47 \times 10^{-5}$ a $4,09 \times 10^{-8}$ [m/s]

De esta manera, se determinó por primera vez que el factor de forma Cs disminuye hasta tres (3) órdenes de magnitud a largo plazo (365 días).

- ✓ Los cambios en la tortuosidad que ocurren en las muestras analizadas al momento del moldeo lograron justificar el 30% de los cambios en las conductividades hidráulicas medidas.
- ✓ Los cambios en la tortuosidad que ocurren en las muestras analizadas al cabo de 365 días lograron justificar apenas un 0,3% de los cambios medidos en los valores de conductividad hidráulica. Por lo tanto, la magnitud de las reducciones de conductividad hidráulica demostradas en este trabajo se encontraría asociada exclusivamente a la reducción de los poros disponibles para la circulación del fluido intersticial.
- ✓ Se identificó que los cambios que se detectaron en los valores de conductividad hidráulica se encuentran vinculados pura y exclusivamente a la formación de hidrogel en los espacios vacíos de las muestras.
- ✓ La formación de los productos de hidratación restringe el flujo de líquido a través de las muestras a medida que envejecen. Esto genera que se reduzca la relación de vacíos efectiva en el proceso de permeado.

7 COMPORTAMIENTO MECÁNICO-HIDRÁULICO DE MEZCLAS

LIMO-BENTONITA ESTABILIZADAS

7.1 INTRODUCCIÓN

Los rellenos sanitarios son construcciones diseñadas para minimizar el impacto de los desechos sólidos en el medio ambiente y la salud humana [Emmanuel et al., 2019]. El componente principal de las celdas de relleno sanitario son las barreras de aislación de fondo, laterales y de cobertura. Además de brindar estabilidad estructural al relleno, el objetivo principal del sistema de barrera consiste en evitar que ocurran procesos de contaminación en el suelo y aguas subterráneas.

En este marco, un sistema de barrera se plantea para que ninguna sustancia nociva del depósito de residuos pueda llegar al medio ambiente. En este Capítulo se presenta la evaluación del comportamiento de las mezclas de limo-escoria a las cuales se les adiciona bentonita con el objetivo de analizar el potencial uso del material para la construcción de barreras ambientales. Se evalúa si este material cumple los requerimientos hidráulicos especificados por normativa para que sea compatible con el material de construcción de una barrera de fondo en un relleno sanitario.

Para esto se trabajó con muestras L-12% SS, añadiendo bentonita en proporciones especificadas, analizando su comportamiento mecánico e hidráulico. En una primera instancia se realizaron ensayos de resistencia a la compresión simple con el objetivo de comparar las muestras estabilizadas con y sin bentonita. Una vez reconocido y analizado el comportamiento de las mismas, se procedió a evaluar la respuesta mecánica-hidráulica trabajando sobre ensayos edométricos acoplados con mediciones de conductividad hidráulica en muestras saturadas tanto con agua destilada como con lixiviado natural, analizando, por último, el comportamiento hidráulico a partir de ensayos de permeabilidad a carga variable. El objetivo específico que se busca es evaluar si se desarrollan en la mezcla con bentonita las reacciones y mejoras en el

comportamiento mecánico e hidráulico identificado para las mezclas limo-escoria (Capítulos 4 a 6).

7.2 INTERACCIÓN LIMO-ESCORIA-BENTONITA

La influencia que genera la adición de partículas de escoria de acería en muestras compuestas de limo-bentonita se evaluó a partir de ensayos de expansión libre. Los mismos se realizaron siguiendo la normativa ASTM descrita en el Capítulo 3 (Materiales y Métodos).

La Figura 7-1 muestra los resultados obtenidos al realizar el análisis sobre cada uno de los materiales que componen las muestras en estado suelto (a) limo; b) escoria; c) bentonita. A partir de los mismos es posible identificar que tanto el material limoso como las partículas de escoria no presentan potencial de expansión, fenómeno que, como se puede apreciar en la Figura 7-1 (c), si fue detectado en la mezcla de bentonita.

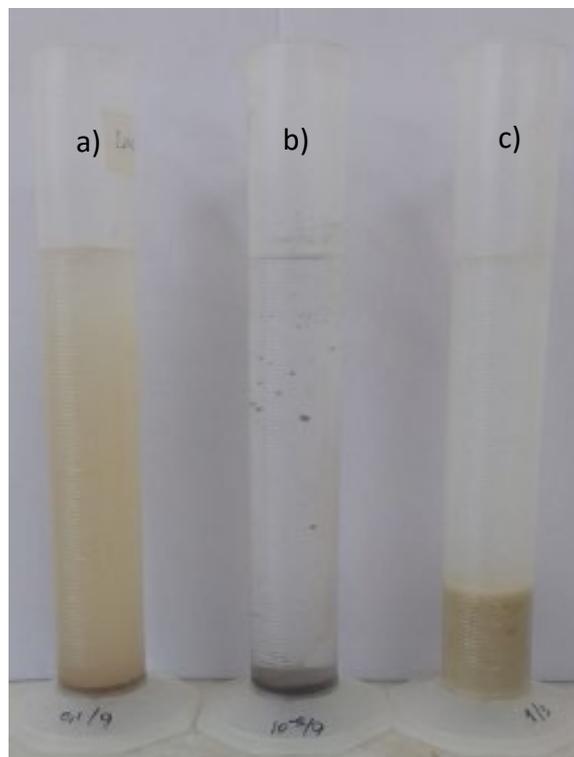


Figura 7-1 Fenómeno de expansión libre en material particulado: a) limo; b) escorias siderúrgicas; c) bentonita.

7.2.1 Expansión libre en mezcla total

Para evaluar la interacción entre diversos materiales se procedió a trabajar con el mismo método de evaluación de expansión libre, analizando mezclas con distintas proporciones de escoria – bentonita, con el objetivo de detectar si existe entre los mismos algún mecanismo de interacción. Para ello se analizaron muestras de 2 gramos cada una compuestas de la siguiente forma:

- 2 partes bentonita - 1 parte escoria (2B:1SS);
- 1 parte bentonita – 2 partes escoria (1B:2SS);
- 1 parte bentonita – 1 parte escoria (1B:1SS).

La Figura 7-2 presenta la imagen de los resultados. A partir de los mismos fue posible identificar que, en todos los casos, las muestras de bentonita con adición de escoria de acería manifiestan expansiones menores a las que se detectaron en la Figura 7-1 (c). Cuando la proporción de bentonita en la mezcla supera la de escoria, (2B:1SS), se observó que la misma manifestó el fenómeno de expansión libre en mayor proporción (Figura 7-2 a), adoptando valores de $8 \text{ cm}^3/\text{g}$. Cuando se analizó la muestra con mayor contenido de escoria que bentonita, (1B:2SS), se detectó que la expansión manifestada resultó menor (Figura 7-2 b), siendo el potencial de expansión de $5 \text{ cm}^3/\text{g}$. Por último, al analizar la muestra binaria de escoria-bentonita en iguales proporciones (1B:1SS) se observó un comportamiento intermedio al anteriormente descrito (Figura 7-2 c) arrojando valores de potencial de expansión de $6 \text{ cm}^3/\text{g}$.

A partir de estos resultados se confirmó que la presencia de escorias en la mezcla analizada modifica el comportamiento expansivo de la bentonita sódica utilizada, limitando el mismo.

7.2.2 Expansión libre en mezcla lavada

Con el objetivo de evaluar si el comportamiento modificado de las partículas de bentonita se debe a la presencia de sales en las escorias, se estudió el proceso de expansión libre en mezclas preparadas en distintas proporciones de arcilla y escorias

lavadas. El lavado de las mismas se realizó previamente con agua destilada. Este procedimiento permitió reducir la concentración de sales solubles en la muestra de escoria desde 1,04% a 0,80%.

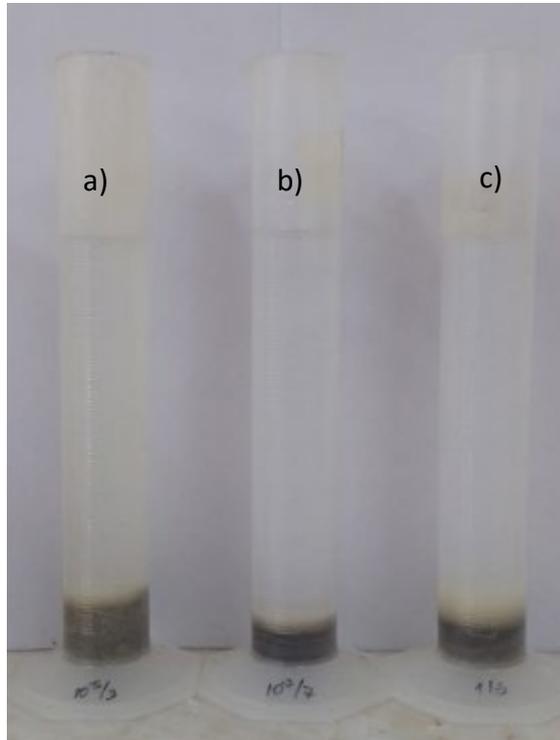


Figura 7-2 Expansión libre en mezclas bentonita-escoria en distintas relaciones: a) 2B:1SS; b) 1B:2SS; c) 1B:1SS.

Para ello se analizaron muestras de 2 gramos cada una compuestas al igual que se mencionó en la sección previa, de la siguiente forma:

- 2 partes bentonita - 1 parte escoria (2B:1SS(w));
- 1 parte bentonita – 2 partes escoria (1B:2SS(w));
- 1 parte bentonita – 1 parte escoria (1B:1SS(w)).

La Figura 7-3 presenta la imagen de los resultados obtenidos. A partir de la misma se observó que las mezclas preparadas con escorias previamente lavadas (SS(w)) manifiestan el mismo comportamiento visualizado en la sección anterior (7.2.1). La mezcla con mayor proporción de bentonita (2B:1SS(w)) es la que manifiesta fenómeno de expansión predominante arrojando valores de $10,5 \text{ cm}^3/\text{g}$. La mezcla con mayor proporción de escorias (1B:2SS(w)) adoptó valores de expansión de $7,5 \text{ cm}^3/\text{g}$, mientras

que la muestra con igual proporción de sólidos (1B:1SS(w)) mostró expansiones de 9 cm³/g.

A partir de las observaciones de la Figura 7-2 y Figura 7-3 se detectó que la presencia de sales de las escorias de acería inhibe el proceso de expansión de la bentonita, siendo que la influencia de las mismas disminuye con el previo lavado de las mismas.

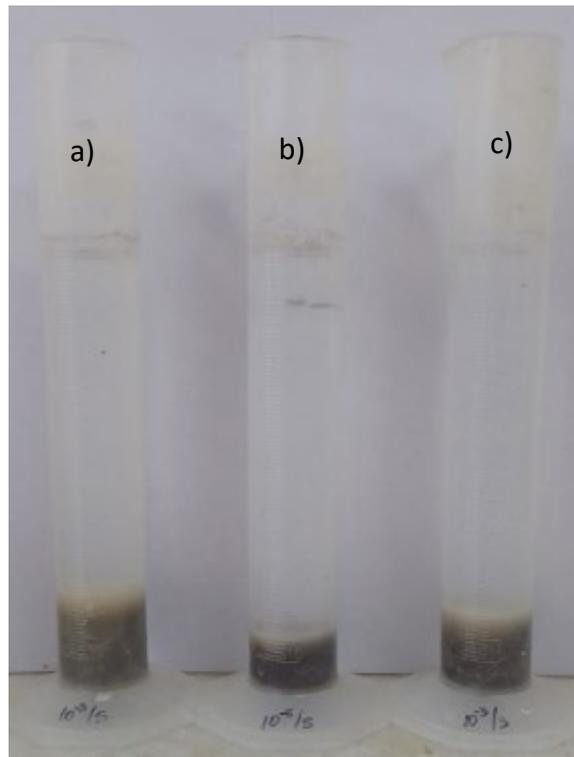


Figura 7-3 Expansión libre en mezclas bentonita-escoria lavada, en distintas relaciones: a) 2B:1SS(w); b) 1B:2SS(w); c) 1B:1SS(w).

7.3 COMPORTAMIENTO TENSO-DEFORMACIONAL DE MUESTRAS LIMO-BENTONITA ESTABILIZADAS

La respuesta tenso-deformacional de las muestras limo-bentonita estabilizadas con 12% de escoria se evaluó en función de ensayos de resistencia a la compresión simple y ensayos de compresión confinada, considerando en la misma la influencia del periodo de almacenamiento.

7.3.1 Influencia del tiempo de curado en muestras con bentonita sobre la RCS

Se realizaron ensayos de resistencia a la compresión simple en probetas gemelas L-12% SS con adiciones al 6% de bentonita con distintos periodos de almacenamiento, siguiendo el procedimiento descrito en la sección Materiales y Métodos (Capítulo 3). El objetivo de los mismos fue evaluar la influencia de la adición de bentonita en el comportamiento tenso - deformacional de las muestras compactadas, analizando las variaciones que presentan las mismas considerando su envejecimiento.

La Figura 7-4 muestra el resultado de las mediciones de compresión no confinada de las muestras ensayadas a 0, 7, 28 y 56 días de almacenamiento. Las mismas alcanzaron valores máximos aproximados de 53, 127, 242 y 288 kPa respectivamente. A partir de estos resultados fue posible identificar que incluso con la adición de bentonita las reacciones puzolánicas siguen gobernando el comportamiento mecánico de las muestras.

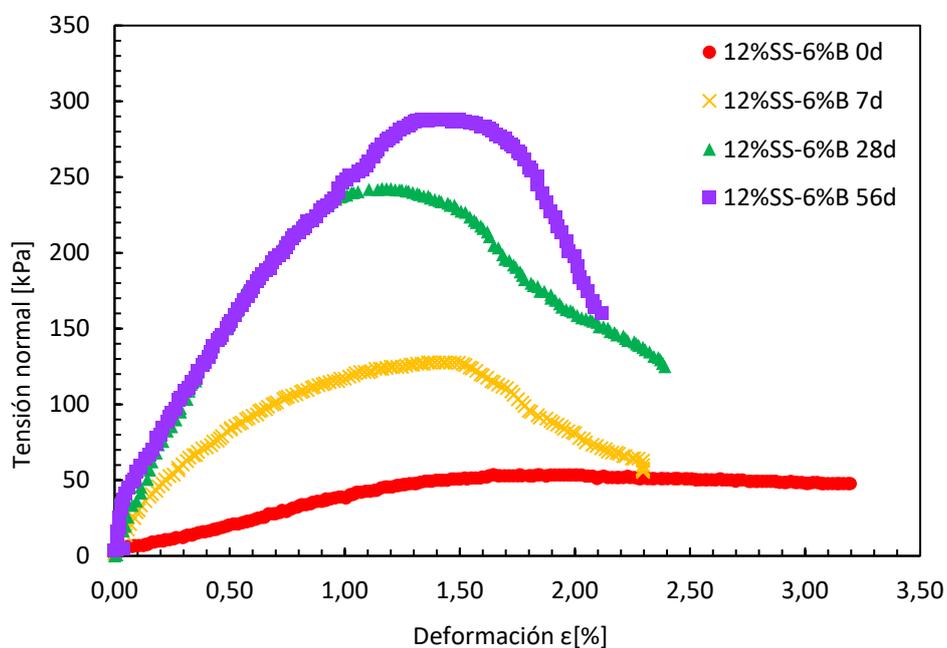


Figura 7-4 Desarrollo de reacciones puzolánicas medido a partir de ensayos en resistencia a la compresión simple-RCS – en muestras L-12% SS - 6% B a 0, 7, 28 y 56 días de almacenamiento.

Si se comparan las resistencias máximas alcanzadas en las mezclas limo-escoria (Tabla 5-2) con los resultados obtenidos para las mezclas limo-escoria-bentonita se observa que la presencia de bentonita genera una ligera mejora en los resultados obtenidos. A modo de ejemplo, las muestras de limo con 12% de escoria sin adición de bentonita acusó valores aproximados de 159 kPa luego de 28 días de almacenamiento. La muestra con adición de bentonita superó este valor manifestando una resistencia máxima de 243 kPa. Tendencias similares se detectaron para los distintos periodos de curado.

A partir de estos estudios fue posible identificar entonces que las SS continúan actuando como activadores de reacciones puzolánicas, siendo que las propiedades de las partículas de bentonita presente en la mezcla en una relación 2SS:1B no logra interferir en el proceso de cementación de las muestras.

La mejora detectada en los valores de RCS en la muestra de bentonita respecto a la muestra de L-12% SS puede asociarse a que la presencia de arcilla modifica la interacción fluido partícula. Las fuerzas eléctricas gobiernan la interacción entre las fases determinando la asociación de partículas y floculación [Mitchell y Soga, 2005]. La adición de bentonita genera que la estructura de suelo se flocule debido a la reducción de repulsión entre partículas [Lambe, 1958; Santamarina et al., 2001; Montoro y Francisca, 2010]. Debido a este proceso, las partículas se orientan de manera aleatoria incrementando la resistencia al corte del suelo. A su vez, el incremento en RCS puede vincularse a fenómenos de succión negativa que ocurren en las muestras, que resulta de mayor importancia en suelos finos-arcillosos [Juarez et al., 2018]. Esto fomenta fenómenos de cohesión aparente que resultan relevantes en el comportamiento de resistencia no confinada.

La Tabla 7-1 ayuda a identificar la tendencia creciente que presentan los valores de resistencia a la compresión simple máximos: es posible identificar que a mayor edad en la muestra se alcanzan mayores valores de resistencia. Este fenómeno se encuentra ligado nuevamente a la cementación existente entre las partículas de limo y escoria que fomenta el desarrollo de hidrogeles analizado en el Capítulo 4, al que se le adiciona el efecto de la bentonita. Este proceso, como se mencionó anteriormente, tiende a

homogenizar la micro estructura de la muestra aumentando el área de contacto entre partículas generando que la misma soporte mayores presiones. De esta manera, al cabo de 56 días la muestra alcanza resistencias aproximadamente 5 veces mayores que al momento del moldeo, superando en un 11% la resistencia alcanzada por la muestra sin bentonita ensayada con el mismo contenido de escoria y mismo tiempo de curado.

Tabla 7-1 Propiedades de las muestras con 6% de adición de bentonita analizadas en RCS.

L-12%SS-6%B				
t [días]	ε [%]	RCS máx. [kPa]	E máx. [MPa]	E50 [Mpa]
0	1,65	53,49	3,25	4,14
7	1,36	127,64	9,37	16,77
28	1,16	242,37	20,86	30,70
56	1,33	288,03	21,60	24,26

Por otro lado, es posible observar que el módulo de elasticidad correspondiente a la resistencia máxima, aumenta con el envejecimiento de la muestra de manera similar a los resultados presentados en el Capítulo 5 para muestras similares sin bentonita. De esta manera, el comportamiento resultante continúa ligado a la fracción fina de suelo siendo que, en todos los casos, la deformación que soporta la muestra es menor que al momento del moldeo. Si bien el E50 manifiesta variaciones en las tendencias analizadas, el mismo incrementa siempre con respecto al correspondiente al momento del moldeo. Además, es importante destacar que los incrementos en los módulos $E_{máx}$ y E50 con el tiempo de curado resultó significativo en comparación con las tendencias obtenidas para las muestras sin bentonita (Tabla 5-2, Capítulo 5). Esto corrobora que la adición de bentonita resulta favorable para las reacciones puzolánicas y, por ende, para la estabilización mecánica de las mezclas.

Para cada una de las muestras ensayadas cuyos resultados se presentaron en la Figura 7-4 y en la Tabla 7-1 se determinó la succión mediante el método de papel de filtro siguiendo la metodología presente en el Capítulo 3. Los resultados se presentan en la Tabla 7-2. Los mismos corroboran que la succión presenta cambios despreciables, motivo por el cual no se puede atribuir a la misma los incrementos de resistencia ni

rigidez medidos en las muestras. Por lo tanto, efectivamente las reacciones puzolánicas resultan responsables de las tendencias detectadas.

Tabla 7-2 Valores de succión obtenidos a través del método del papel de filtro.

L-12% SS-6% B	
Edad [días]	$h = 5,327 - 0,0779wf$ [kPa]
0d	3,56
7d	3,66
28d	3,68
56d	3,77

7.3.2 Influencia de la adición de SS en la compresibilidad de las muestras estabilizadas

La evolución de compresibilidad de las muestras L-12% SS-6% B fue analizada mediante ensayos edométricos a 0, 7, 28 y 56 días, siguiendo los lineamientos descritos en la sección Materiales y Métodos (Capítulo 3).

La Figura 7-5 muestra los resultados de las curvas de compresibilidad obtenidas a partir de los ensayos realizados sobre muestras que fueron compactadas al 80% de la energía de compactación, inundadas tanto con agua destilada (a) como con lixiviado (b). Si bien todas las muestras presentaron una relación de vacíos inicial similar, ($e_0 = 0,95 \pm 0,1$), con el objetivo de visualizar con mayor facilidad el proceso de rigidización que ocurre en las muestras, el eje semilogarítmico del gráfico presenta su valor inicial $x = 10$.

Los resultados obtenidos permiten observar que existe un comportamiento mecánico similar en términos de compresibilidad, la cual resulta indiferente al fluido intersticial siendo que tanto muestras inundadas con agua destilada [W] como con lixiviado [LL] manifestaron la misma respuesta mecánica. Esto indica que la reacción puzolánica que ocurre entre las partículas de limo-escoria-bentonita nuevamente no resulta afectada por la presencia de los elementos químicos presentes en altas concentraciones como los presentes en el lixiviado natural utilizado.

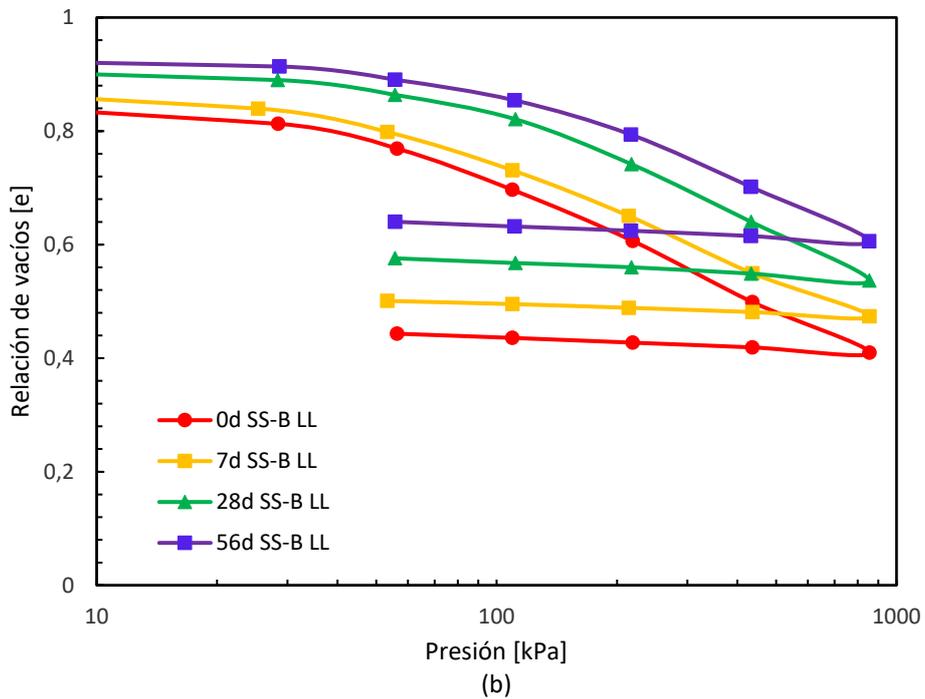
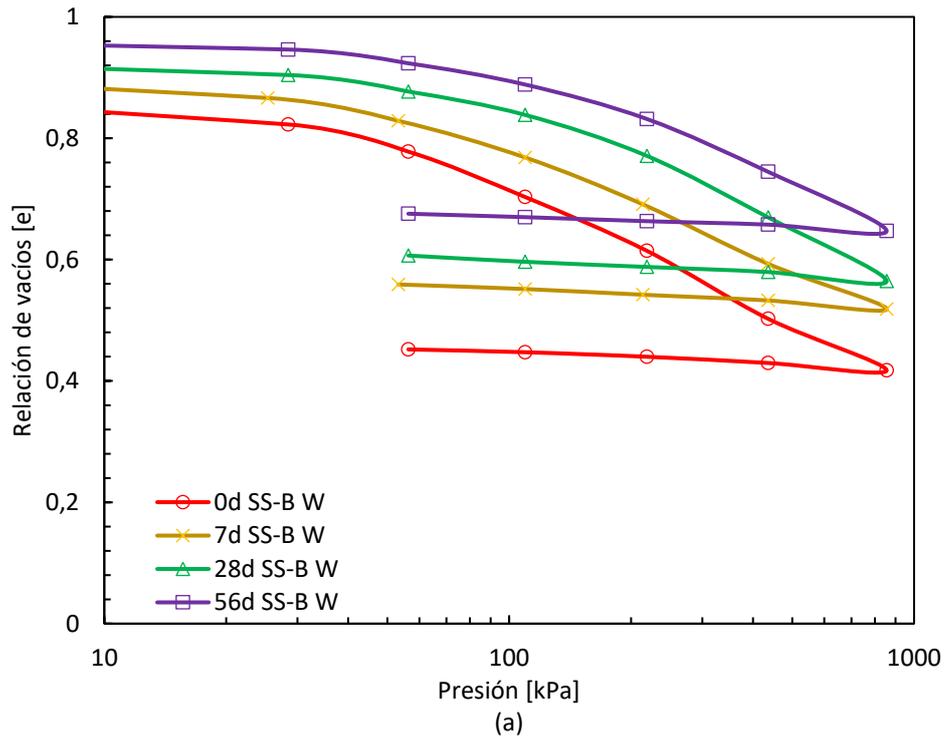


Figura 7-5 Influencia del tiempo de curado en la compresibilidad de muestras L-12% SS – 6% B, permeados con agua destilada [W] (a) y lixiviado natural [LL] (b).

A partir de las gráficas semilogarítmicas presentadas en la Figura 7-5 se determinó el índice de compresibilidad (C_c) junto con el módulo edométrico (EM) y la presión de

fluencia (σ fluencia) para cada muestra y tiempo de curado. La Tabla 7-3 presenta la variación detectada en estos parámetros. Siendo que no se detectaron cambios significativos en el comportamiento mecánico de las muestras al ser permeadas con distintos fluidos, la misma (Tabla 7-3) presenta los valores medios obtenidos para muestras gemelas con el mismo envejecimiento y distinto fluido intersticial.

Tabla 7-3 Propiedades edométricas de mezclas L-12% SS-6% B.

Tiempo [días]	Cc	Em [Mpa]	σ fluencia [kPa]
0	0,30	5,89	58,50
7	0,28	5,96	63,50
28	0,27	6,68	94,50
56	0,24	7,63	103,00

Estos resultados permiten cuantificar los procesos de rigidización que ocurren con el envejecimiento de la muestra a partir del incremento de las presiones de fluencia y variaciones del coeficiente de compresibilidad. La presión de fluencia media varía desde valores aproximados de 60 kPa en la muestra a los 0 días de almacenamiento alcanzando valores de 103 kPa al cabo de 56 días de almacenamiento. De manera análoga, los coeficientes de compresibilidad, disminuyen adoptando valores de 0,30, 0,28, 0,27 y 0,24 para 0, 7, 28 y 56 días de curado. Estas tendencias marcadas con el envejecimiento de las muestras se encuentran vinculadas exclusivamente al desarrollo de reacciones puzolánicas que ocurren en las muestras a lo largo del tiempo. El fenómeno de rigidización observada se traduce a menores niveles de deformación para un mismo estado tensional a medida que el periodo de almacenamiento se incrementa.

La Figura 7-6 presenta los resultados de los ensayos de compresibilidad en términos de tensión-deformación (σ - ϵ_v), tanto de las muestras inundadas con agua destilada [W] (a) como con lixiviado natural [LL] (b). A partir de esta representación se observó que, para un mismo estado tensional en el tramo de carga, a medida que la muestra envejece el nivel de deformación adquirido por la muestra es menor.

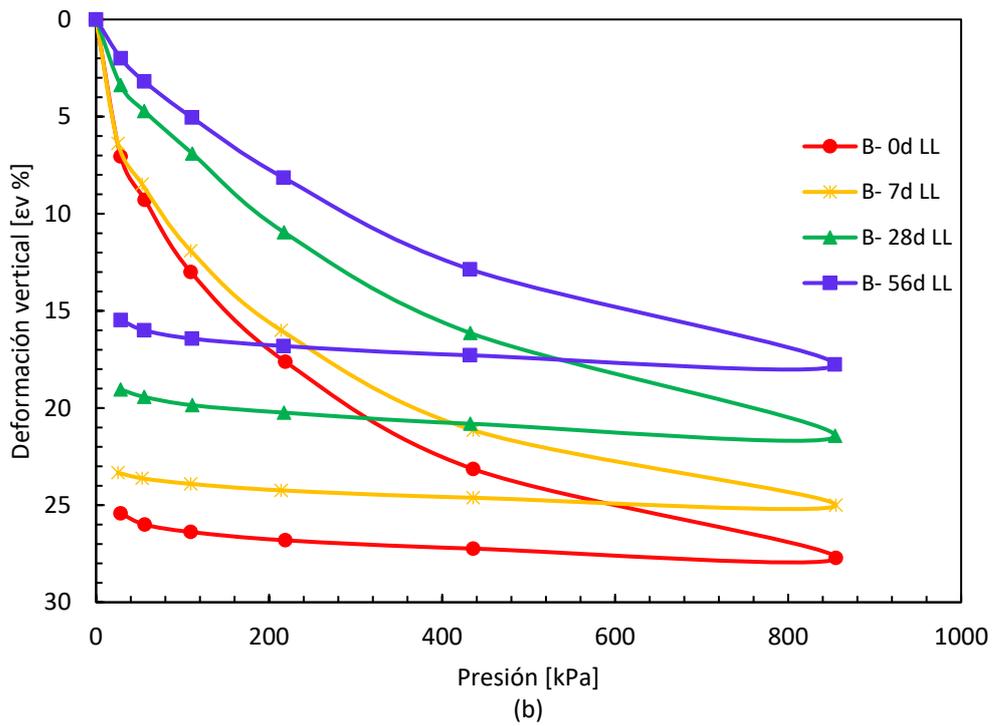
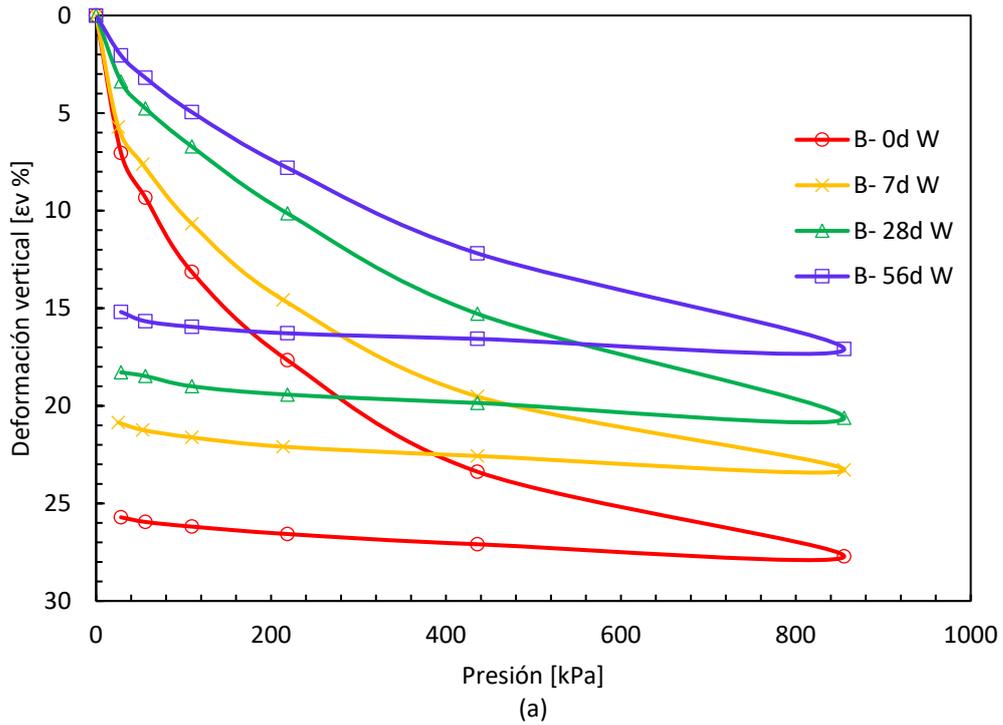


Figura 7-6 Influencia del tiempo de curado en la deformación de muestras L-12% SS – 6% B, permeadas con agua destilada (a) y lixiviado natural (b).

Por ejemplo, para una carga de 432 kPa el nivel de deformación de la muestra con 0 días de almacenamiento resulta de 24%. A medida que la muestra envejece dicho nivel

disminuye adoptando valores aproximados de 19, 15 y 12% al cabo de 7, 28 y 56 días de respectivamente. De manera similar, la deformación máxima alcanzada por cada muestra se reduce. En la muestra ensayada al momento del moldeo la deformación máxima resulta de 28% mientras que al cabo de 56 días el nivel de deformación acusa valores aproximados de 17%. Esto implica que el envejecimiento de las muestras genera la disminución de un 11% en los niveles de deformación alcanzados.

Por otro lado, analizando el tramo de descarga, se identificó que las muestras con adición de bentonita manifestaron la misma tendencia que las muestras de limo-escoria a mantener deformaciones permanentes. Este proceso se observó de manera similar en la Figura 7-6 (a) y (b) donde se observa que el tramo de descompresión permanece prácticamente horizontal implicando que el coeficiente de descompresión mantiene valores constantes.

7.4 COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE MUESTRAS LIMO-BENTONITA ESTABILIZADAS CON ESCORIAS

El comportamiento hidráulico de las muestras estabilizadas con escoria y adición de bentonita fue analizado a partir de resultados obtenidos de ensayos edométricos acoplados con mediciones de conductividad hidráulica, junto con ensayos de conductividad hidráulica realizados en muestras compactadas en permeámetros de pared rígida. A continuación, se exponen los resultados obtenidos en cada instancia.

7.4.1 Influencia del estado tensional y envejecimiento

Los resultados de las conductividades hidráulicas obtenidas para muestras L-12% SS-6% B permeadas tanto con agua destilada (W) como con lixiviado natural (LL) en función de la presión vertical aplicada en el ensayo edométrico se presentan en la Figura 7-7 (a) y (b) respectivamente. La misma permite identificar que para una misma muestra la conductividad hidráulica disminuye a medida que se modifica el estado tensional aumentando la carga de compresión confinada. Este proceso se encuentra vinculado al

reacomodamiento estructural que existe en la muestra que reduce la relación de vacíos en la misma.

De manera similar a lo que ocurre en las muestras analizadas en el Capítulo 6, (L-12% SS), es posible observar que para un mismo estado tensional los valores de conductividad hidráulica son menores a medida que la muestra envejece. Esta reducción se encuentra relacionada claramente a que existe una reducción en los espacios porales “libres” y “disponibles” para el flujo dentro en la muestra. Por un lado y a partir de los resultados expuestos en la sección previa (7.3), existen en las mezclas procesos de cementación que ocurren debido a reacciones de tipo puzolánico entre las partículas de limo y SS. Pero, por otro lado, la mezcla en análisis presenta 6% de bentonita, cuya principal característica radica en su potencial de expansión al entrar en contacto con agua.

En este sentido, la tendencia observada en la reducción en los valores de conductividad hidráulica para una misma muestra podría estar vinculada tanto a la reducción en la relación de vacíos propia de la prueba de consolidación, como así también a la expansión de las partículas de bentonita dentro de la muestra. Sin embargo, el alto contenido de sales aportado por la escoria condiciona el potencial de expansión de la arcilla, como se mostró en la Figura 7-2 y Figura 7-3, y, del mismo modo, limita la reducción de conductividad hidráulica esperada para las mezclas de limo-escoria-bentonita.

Es por ello que los cambios de conductividad hidráulica detectados se atribuyen principalmente a reacciones de tipo puzolánico que continúan desarrollándose incluso con la adición de bentonita, entre las partículas de limo y escoria de acuerdo a lo evidenciado por el comportamiento mecánico, siendo que el fenómeno de expansión por mínimo y limitado que fuera, contribuye a la reducción de espacios vacíos disponibles para flujo.

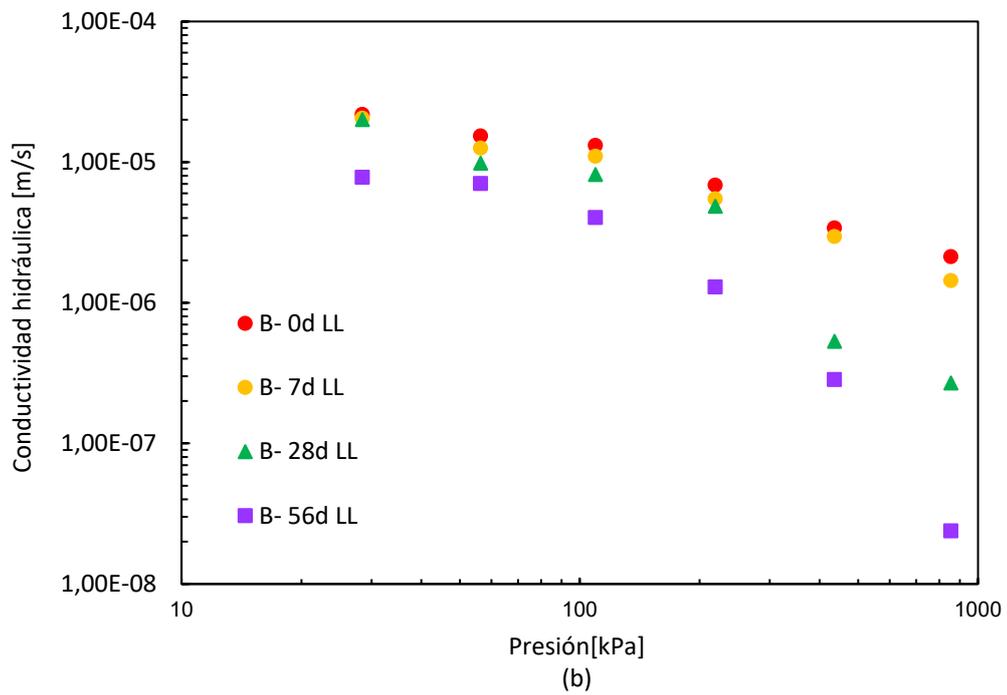
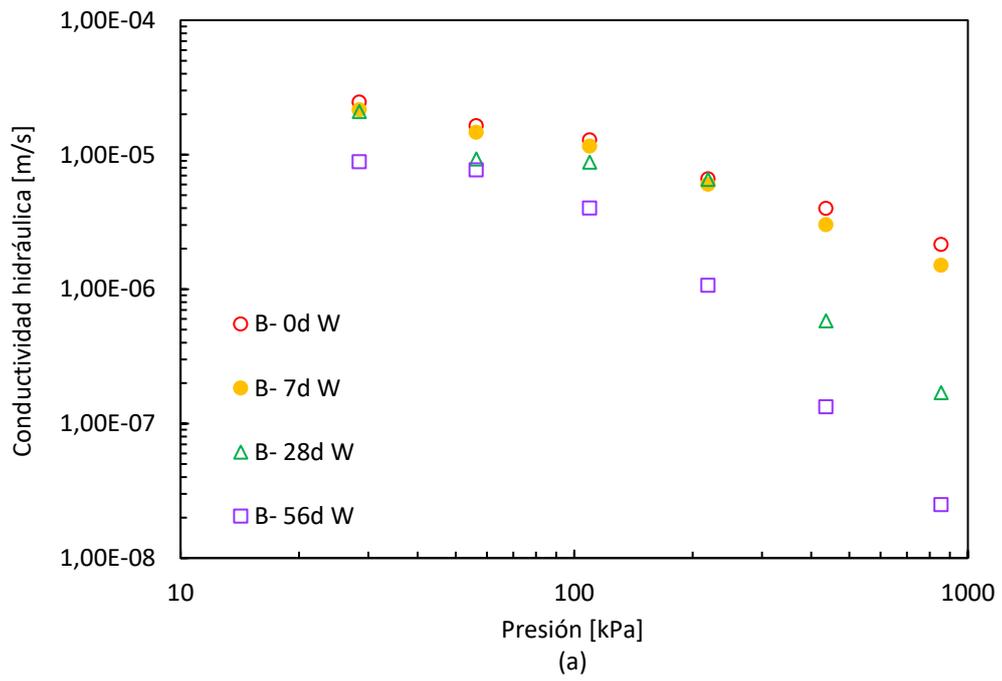


Figura 7-7 Comportamiento hidráulico medido a partir de variaciones en el estado tensional de las muestras L- 12% SS - 6% B, permeadas con agua destilada (a), y lixiviado natural(b).

7.4.2 Influencia de la relación de vacíos inicial

El objetivo de esta sección es analizar el potencial que presenta la mezcla L- 12% SS- 6% B para ser considerada, de acuerdo a los requerimientos hidráulicos de un sistema de barrera, como material para la construcción de la misma. Para ello se analiza la influencia del grado de compactación en la muestra como así también la presencia de sales presentes en las escorias que inhiben el comportamiento expansivo de las partículas de arcilla. Dicho análisis se realizó a partir de ensayos de permeabilidad en permeámetros de pared rígida con flujo ascendente, como se explicó en el Capítulo 3 (Materiales y Métodos).

7.4.2.1 *Influencia de la compactación relativa en la conductividad hidráulica*

Con la finalidad de evaluar la influencia del grado de compactación en las muestras de limo-bentonita estabilizadas con escorias, se realizaron ensayos para determinar la conductividad hidráulica de mezclas compactadas al 90 y 100% de la energía de compactación obtenida del procedimiento Proctor estándar (Capítulo 3).

Los resultados de las pruebas se exponen en la Figura 7-8, la cual representa valores medios de conductividad hidráulica medidos en muestras L-12% SS-6% B junto con el valor de conductividad estipulado por la normativa en cuanto a requerimiento hidráulico para que sea considerado como material de construcción para una barrera en un relleno sanitario. Como es posible observar a medida que se incrementa el nivel de compactación y, por consiguiente, la relación de vacíos de la muestra disminuye, la conductividad hidráulica se reduce. La muestra compactada al 90% de la EC acusó valores de $1,20 \times 10^{-8}$ m/s, mientras que la preparada en el punto óptimo de la curva de compactación presenta valores de conductividad hidráulica media de $5,97 \times 10^{-9}$ m/s.

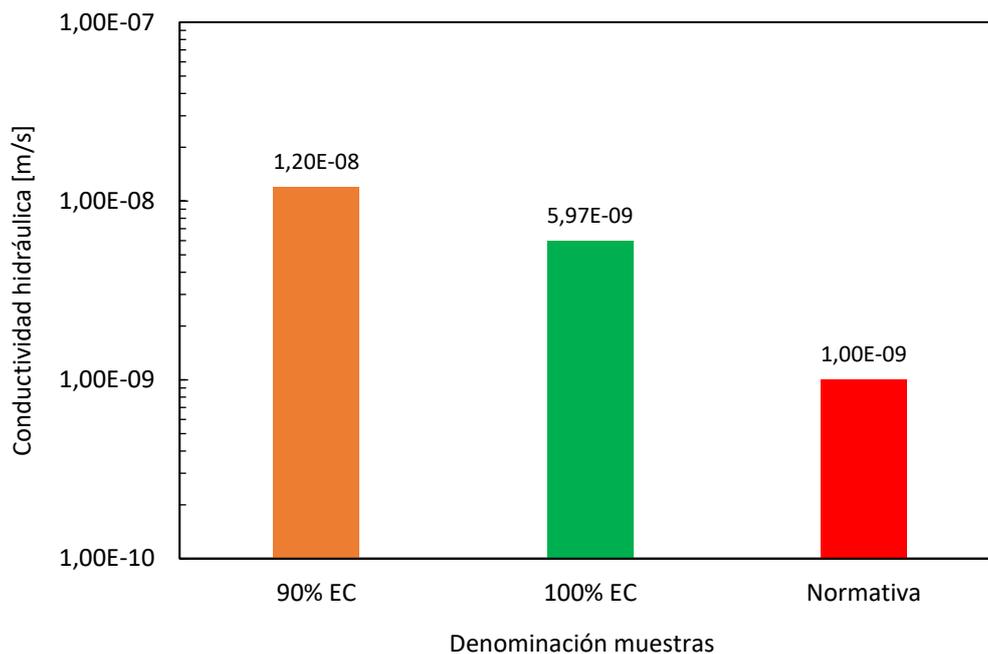


Figura 7-8 Comportamiento hidráulico de muestras L-12% SS-6% B con distinta densidad.

A partir de los resultados expuestos en la Figura 7-8 es posible detectar que la mezcla analizada no cumple con las exigencias propuestas por la normativa ($k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s), con lo cual la muestra no resulta aconsejable para su utilización como barrera.

Al comparar los resultados expuestos con los resultados obtenidos en las muestras estudiadas en el capítulo anterior (L-12% SS), tanto en los ensayos de permeabilidad como a partir de los resultados de los ensayos edométricos, fue posible observar que no existen variaciones significativas en los resultados obtenidos. Esto se encuentra vinculado a que la presencia de escorias en las muestras estudiadas modifica el comportamiento expansivo de la bentonita limitando el mismo (Figura 7-2 y Figura 7-3). Dado que el comportamiento de las arcillas se encuentra gobernado por mecanismos de doble capa difusa, la concentración de sales en el medio modifica la tensión neta resultante (repulsión-atracción) entre partículas [Mitchell y Soga, 2005]. De este modo, a medida que aumenta la concentración de sales en el medio la fuerza repulsiva neta resultante disminuye junto con el espesor de la doble capa difusa, lo cual resulta en la contracción de la muestra de arcilla [Barbour y Fredlund, 1989].

En este caso en particular la muestra L-12% SS compactada al 90% de la EC y permeada al momento del moldeo acusó valores de $1,23 \times 10^{-8}$ m/s, siendo que la muestra con adiciones de bentonita compactada con la misma energía adoptó valores de $1,20 \times 10^{-8}$ m/s. El resultado obtenido deja en evidencia que la adición de bentonita en las muestras no genera la reducción en los valores de conductividad esperados.

7.4.2.2 *Influencia de la presencia de sales*

A partir de los resultados obtenidos se analizaron probetas compactadas al 90% y 100% de la EC preparadas con escorias previamente lavadas. La Figura 7-9 presenta los resultados obtenidos tanto a partir de la preparación de muestras con escorias sin tratamiento previo (presentados en la sección 7.4.2.1), junto con las muestras compactadas con distinta energía y con partículas de escorias lavadas (w). En la misma se presenta nuevamente como valor de referencia al valor que estipula la normativa vigente.

A partir de la Figura 7-9 se puede identificar que el proceso de lavado de escorias para preparar las muestras permite, en todos los casos, reducir los valores de conductividad hidráulica. Este fenómeno resulta de mayor relevancia en la muestra compactada al 100% de la EC debido a que al reducir la presencia de sales en las escorias se reduce la influencia de las mismas sobre el comportamiento expansivo de las partículas de bentonita generando cambios significativos en el comportamiento hidráulico de las muestras.

La diferencia detectada en las muestras compactadas con escorias lavadas se encuentra vinculada a la relación de vacíos inicial que presentan las muestras. La muestra compactada al 90% de la EC manifestó valores medios de $8,78 \times 10^{-9}$ m/s, mientras que la muestra compactada al 100% acusó valores de $9,71 \times 10^{-10}$ m/s. Un mismo “nivel de expansión” de las partículas de bentonita se traduce a menores valores de conductividad hidráulica en la muestra que inicialmente presenta menor relación de vacíos. El fenómeno de expansión en las partículas de arcilla, por mínimo que sea, representa siempre cambios en la relación de vacíos. De esta manera la muestra que

inicialmente presenta una relación de vacíos menor (compactada al 100% de la EC) manifiesta cambios de mayor significancia en las propiedades hidráulicas de la muestra.

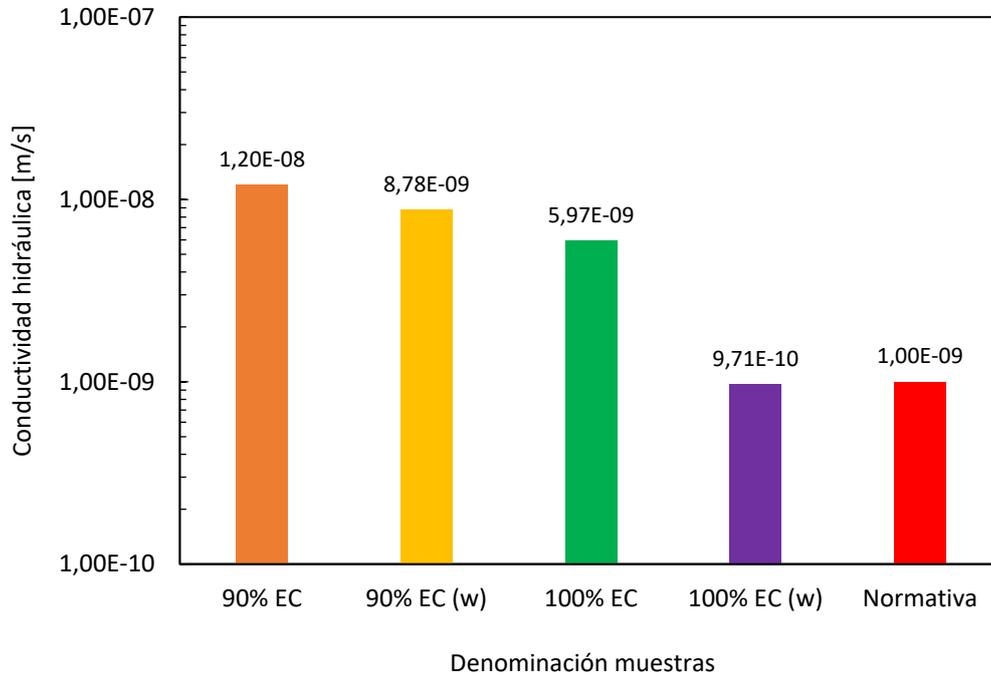


Figura 7-9 Influencia de la presencia de sales sobre el comportamiento hidráulico de muestras L-12% SS- 6% B.

Estos resultados indican, por tanto, que la presencia de escorias en las muestras de limo-bentonita generan una solución rica en sales que condiciona el comportamiento de las partículas de bentonita. Sin embargo, al lavar las mismas (reduciendo o eliminando la presencia de sales en la solución), las partículas de arcilla logran vencer los cambios en las fuerzas netas entre partículas manifestando proceso de expansión, provocando disminuciones en los valores de conductividad hidráulica obtenida.

Este resultado permite detectar que la mezcla L-12% SS – 6% B resulta compatible a ser considerada como material de construcción para una barrera en un relleno sanitario de acuerdo a los requerimientos hidráulicos estipulados por normativa.

7.5 ANÁLISIS COMPARATIVO CON LIMOS DE DIVERSA PROCEDENCIA

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo de investigación se realizó un análisis comparativo para evaluar la variabilidad de los mismos con respecto a los valores reportados por diversos autores para materiales similares de limo y limo estabilizado.

En la Tabla 7-4 se resumen los valores de resistencia obtenidos para muestras de limo sometidas a distintas condiciones, como lo señalan las observaciones de la misma. De manera similar la Tabla 7-5 presenta resultados de conductividad hidráulica obtenidos por diversos autores. A partir de ambas tablas es posible identificar que existe gran variabilidad en los resultados obtenidos, en función de las características propias tanto del limo como del material de estabilización utilizado, es decir, en función de la procedencia de los materiales.

Como se puede apreciar en la Tabla 7-4, es posible detectar que la estabilización de limo con materiales aglutinantes como cemento y cal permiten obtener valores de resistencias superiores a menores periodos de tiempo. Estos resultados se encuentran vinculados a la rapidez con la cual estos materiales pueden formar reacciones puzolánicas. Sin embargo, cada mecanismo de estabilización investigado presenta sus propias características, como la densidad de compactación, el contenido óptimo de adiciones, controles de temperatura y humedad, etc. A su vez, es posible identificar que se han estudiado diversas técnicas para lograr este fenómeno de estabilización como, por ejemplo, evaluando la influencia de la temperatura en el curado de las mezclas.

Como lo indica la Tabla 7-4, el limo loésico de Córdoba estabilizado con 3% cemento logra valores de resistencia de 560 kPa al cabo de 28 días de almacenamiento. Las muestras investigadas en este trabajo arrojaron valores comparables a este resultado al cabo de 365 días de curado. Por tanto, si bien la adición de escoria permite obtener mejoras en el comportamiento mecánico de las muestras, las mismas ocurren diferidas en el tiempo debido a la velocidad a la cual ocurren las reacciones puzolánicas, como fue analizado anteriormente.

Tabla 7-4 Valores de RCS reportados para muestras de limo en diversas condiciones.

Material	Resistencia a la compresión simple	Observaciones	Referencia
Limo	50 [kPa]	Loess Plateau, Córdoba	Constantini et al., 2022
Limo	60 [kPa]	Loess Plateau, Córdoba	Adami, 2014
Limo	100 [kPa]	Loess Plateau, Córdoba, con 60 días de curado	Vettorelo, 2020
Limo	230 [kPa]	China, contenido de humedad 13%, densidad 1,81 g/cm ³	Li et al., 2018
Limo + 3% cal	1200 [kPa]	Loess de Shaanxi, China, con 7 días de curado	Gu y Chen, 2020
Limo + 7% cal	2000 [kPa]	Contenido óptimo de cal para loess chino, estabilizado y calentado a 30 °C	Bao et al., 2022
Limo + 6% cal	1000 [kPa]	Loess Plateau, Córdoba, con 60 días de curado	Vettorelo, 2020
Limo + 3% cemento	560 [kPa]	Loess Plateau, Córdoba, con 28 días de curado	Constantini et al., 2022
Limo + 3% cemento	1200 [kPa]	Loess lowa en estado no saturado, con 7 días de curado	Zhang et al., 2019
Limo + 5% cemento	500 [kPa]	Loess de Shaanxi, China, con 3 días de curado	Gu y Chen, 2020
Limo + 5% cemento	2200 [kPa]	Loess lowa en estado no saturado, con 7 días de curado	Zhang et al., 2019
Limo +10% ceniza volante	500 [kPa]	Loess de Shaanxi, China, con 3 días de curado	Gu y Chen, 2020
Limo + 10% ceniza volante	700 [kPa]	Loess lowa en estado no saturado, con 7 días de curado	Zhang et al., 2019
Limo + 15% fosfoyeso	500 [kPa]	Loess de Shaanxi, China, con 3 días de curado	Gu y Chen, 2020

A partir de la Tabla 7-5 es posible identificar que la técnica común para mejorar el comportamiento hidráulico de los limos loésicos consiste en la adición de bentonita. Esta técnica se emplea, principalmente, para poder cumplir con los requerimientos de normativas que buscan el aprovechamiento de suelo local como material de construcción de barreras en rellenos sanitarios.

Tabla 7-5 Valores de K reportados para muestras de limo en diversas condiciones.

Material	Conductividad hidráulica	Observaciones	Referencia
Limo	1×10^{-5} [cm/s]	Loess Plateau, Córdoba en terreno natural. Permeado con agua destilada	Francisca, 2002
Limo	1×10^{-4} [cm/s]	Loess Plateau, Córdoba muestra inalterada	Terzariol et al., 2003
Limo	$2,2 \times 10^{-5}$ [cm/s]	Malan loess, China. Compactado, permeado con solución pH = 3	Xu et al., 2021
Limo	$1,5 \times 10^{-5}$ [cm/s]	Malan loess, China. Compactado, permeado con solución pH = 7	Xu et al., 2021
Limo	1×10^{-5} [cm/s]	Malan loess, China. Compactado, permeado con solución pH = 11	Xu et al., 2021
Limo	9×10^{-5} [cm/s]	Loess Plateau, Córdoba compactado en el punto óptimo. Permeado con AD con gradiente < 5	Francisca et al., 2009
Limo + 3% bentonita	$2,19 \times 10^{-8}$ [cm/s]	Loess Plateau, Córdoba compactado con densidad seca $15,70 \text{ kN/m}^3$. Permeado con agua destilada	Biga et al., 2015
Limo + 5% bentonita	5×10^{-7} [cm/s]	Loess Plateau, Córdoba compactado en el punto óptimo. Permeado con agua destilada con gradiente < 5	Francisca et al., 2009
Limo + 6% bentonita	$2,12 \times 10^{-8}$ [cm/s]	Loess Plateau, Córdoba compactado con densidad seca $15,90 \text{ kN/m}^3$. Permeado con agua destilada	Biga et al., 2015
Limo + 9% bentonita	$1,73 \times 10^{-8}$ [cm/s]	Loess Plateau, Córdoba compactado con densidad seca $15,90 \text{ kN/m}^3$. Permeado con AD	Biga et al., 2015
Limo + 10% bentonita	7×10^{-7} [cm/s]	Loess Plateau, Córdoba compactado en el punto óptimo. Permeado con agua destilada con gradiente < 5	Francisca et al., 2009
Limo + 3% Cal	9×10^{-5} [cm/s]	Yan'an - Loess chino, compactado con densidad seca $1,53 \text{ g/cm}^3$	Gao et al., 2018
Limo + 6% cal	$1,3 \times 10^{-6}$ [cm/s]	Yan'an - Loess chino, compactado con densidad seca $1,63 \text{ g/cm}^3$	Gao et al., 2018

A partir de las tablas presentadas, se detecta que la variabilidad de los valores de conductividad hidráulica de limos es menor a la observada en los ensayos de resistencia a la compresión simple. A su vez, es posible identificar que el parámetro hidráulico no manifiesta cambios de orden de magnitud al ser permeado con distintas soluciones, comportamiento similar al detectado en este trabajo.

La adición de bentonita genera, en todos los casos, disminuciones en los valores de conductividad hidráulica, debido al fenómeno de expansión que ocurre en las muestras. De manera similar a lo mencionado para los valores de resistencia presentados, cabe aclarar que cada ensayo presenta características de estudio distinto, en función del método de compactación, líquido permeante, densidad lograda, etc. En todos los casos, sin embargo, a medida que la densidad de la muestra es mayor, el parámetro hidráulico se reduce en mayor medida. No obstante, es posible detectar que, al momento del moldeo, las muestras estabilizadas con cal no reflejan disminución significativa en los parámetros hidráulicos estudiados, con respecto a la muestra sin adiciones para el mismo autor.

Si bien se considera necesario un análisis exhaustivo de la huella de carbono para cada material en la región de estudio, los resultados obtenidos indicarían que la implementación de escoria como agente estabilizador de suelo loésico favorecería a la reducción de emisiones de CO₂ equivalentes incorporadas a la atmósfera. Esto se vincula a la comparación entre valores de resistencia alcanzados en las muestras L-12%SS alcanzados, lo cual permitiría el reemplazo de una fracción del cemento utilizado al fin de estabilizar los limos loésicos.

7.6 IMPLICANCIAS Y LIMITACIONES DE CONOCIMIENTOS GENERADOS

El estudio de propiedades mecánicas e hidráulicas analizados en esta sección sobre mezclas limo-bentonita estabilizadas con escorias permitió detectar resultados únicos. Por un lado, los resultados permitieron corroborar que las reacciones puzolánicas generadas por la adición de escorias continúan desarrollándose en las muestras con adiciones de arcillas. Estas últimas favorecen la cohesión aparente que se genera en la

muestra lo cual se traduce en mejoras en el comportamiento mecánico analizado. Por otro lado, los resultados permitieron reconocer el comportamiento hidráulico de las mezclas estabilizadas generando un aporte novedoso: hasta el momento se desconocía el mismo debido a que por lo general se analiza únicamente el comportamiento mecánico de las mezclas estabilizadas.

Si bien se demostró que las reacciones puzolánicas resultan favorables para reducir la conductividad hidráulica del suelo estabilizado, se detectó que este efecto puede verse afectado por la presencia de sales. A partir del análisis realizado se estudió que, para reducir la conductividad hidráulica en suelo donde predomina el comportamiento de la doble capa difusa, es importante la reducción de sales presentes en los materiales.

El objetivo principal consiste en evaluar el potencial de las escorias siderúrgicas para lograr la estabilización de suelos loésicos, buscando además de mejorar el comportamiento geotécnico del mismo, reutilizar un desecho de la industria siderúrgica reduciendo la disposición final del mismo como desecho.

Una aplicación potencial que tiene este suelo estabilizado consiste en utilizarlo como material de construcción para una barrera de relleno sanitario. Para cumplir con los requerimientos especificados por la normativa vigente resultó ser necesaria la adición de arcillas expansivas en la mezcla planteada. La principal limitación de la misma se encuentra ligada a la presencia de sales en las partículas de escoria de acería las cuales inhiben el comportamiento de la bentonita. Este efecto genera que incluso con la adición de arcillas no se logre cumplir el requerimiento estipulado por la normativa. Sin embargo, se estudió que con el previo lavado de las escorias se logra reducir el efecto de inhibición generado por la presencia de sales alcanzando de esta forma cumplir con la normativa vigente.

Los resultados obtenidos resultan válidos, sin embargo, para los lixiviados de la provincia de Córdoba provenientes del relleno sanitario Piedras Blancas ubicado en esta localidad. En este sentido, es necesario destacar que, debido a la variación de las propiedades de los lixiviados en función de los residuos generados por la población, la interacción que

ocurre entre la mezcla suelo-escoria-bentonita y el líquido permeante deberá ser investigado para cada situación en particular.

7.7 PRINCIPALES APORTES DEL CAPÍTULO

A partir de los estudios realizados y analizados en este Capítulo fue posible identificar que la adición de bentonita en mezclas de limo-escoria influencia de manera positiva las reacciones puzolánicas que ocurren en las muestras estabilizadas. Las partículas de arcilla favorecen la cohesión de la mezcla lo que se traduce a mejoras en el comportamiento mecánico. Tanto los valores de resistencia a la compresión simple máxima como los módulos de deformación de las muestras analizadas se incrementaron con el tiempo de curado. El desarrollo de los mecanismos de cementación en las muestras favorece la rigidización detectada con el paso del tiempo, reduciendo los niveles de deformación que alcanzan las muestras. Las principales conclusiones obtenidas se resumen de la siguiente manera:

- ✓ La adición de bentonita en muestras de limo estabilizadas con escorias siderúrgicas favoreció la cementación de partículas a partir de reacciones de tipo puzolánico que continuaron desarrollándose en las mezclas, favoreciendo las mejoras detectadas en el comportamiento mecánico de los limos estabilizados. A partir de los resultados obtenidos en resistencia a la compresión simple se detectó que:
 - El desarrollo de estas reacciones generó incrementos en la resistencia a la compresión máxima alcanzada con el envejecimiento. La resistencia máxima de la muestra al cabo de 28 días resultó de 242 kPa aproximadamente, mientras que al cabo de 56 días de almacenamiento dicho valor se incrementó a 290 kPa. Al cabo de 28 días de curado el incremento de resistencia a la compresión no confinada fue del orden de 350% mientras que al cabo de 56 días el incremento resultó del orden del 540% con respecto a la mezcla analizada al momento del moldeo.
 - Este incremento de resistencia se encuentra vinculado exclusivamente a reacciones de tipo puzolánico siendo que la succión manifestó

variaciones insignificantes con el paso del tiempo. La tendencia indica que el desarrollo de hidrogeles en el espacio poral de las muestras tiende a aumentar los contactos entre partículas, con lo cual la mezcla puede soportar mayores presiones para un nivel determinado de deformaciones (aumento de rigidez).

- Los módulos de deformación se incrementaron con el paso del tiempo, mostrando un comportamiento frágil con el envejecimiento. Las deformaciones asociadas a los valores de resistencia máxima alcanzada resultan menores con el incremento del periodo de curado de las muestras.
- ✓ La rigidización detectada a partir de ensayos de resistencia a la compresión simple se complementó con la generación de datos para muestras ensayadas en compresión confinada. A partir del análisis de compresibilidad se obtuvo que:
 - La tendencia a la rigidización de las muestras con el tiempo manifestó aumentos marcados en la presión de fluencia. La muestra analizada al momento del moldeo acusó presiones de fluencia de 58 kPa, incrementándose hasta 94 y 103 kPa al cabo de 28 y 56 días de almacenamiento respectivamente.
 - Los niveles de deformación que acusan las muestras estabilizadas disminuyeron con el envejecimiento. Al momento del moldeo la muestra soportó deformaciones del 28%, acusando deformaciones de 21 y 17% al cabo de 28 y 56 días respectivamente, para la máxima presión vertical aplicada (856 kPa).
- ✓ Se detectó que la presencia de compuestos químicos en altas concentraciones presentes en un lixiviado de relleno sanitario no modifica el comportamiento de las muestras. La respuesta que se obtuvo a partir de permear las muestras con agua destilada y con lixiviado fue similar en términos tanto mecánicos como hidráulicos. El fluido intersticial no afectó, de acuerdo a los resultados obtenidos, los hidrogeles desarrollados en las muestras. Esto corrobora que los hidrogeles y productos cementantes desarrollados presentan una buena compatibilidad química con lixiviados de rellenos sanitarios.

- ✓ A partir de los ensayos edométricos acoplados con mediciones de conductividad hidráulica se observó que el comportamiento hidráulico resulta dependiente tanto de la carga aplicada como de la edad de la muestra.
 - A medida que el estado tensional se incrementa, la conductividad hidráulica disminuye producto de la reducción de espacios vacíos disponibles. La muestra de 28 días de almacenamiento permeada con agua destilada acusó valores de conductividad hidráulica de $5,8 \times 10^{-7}$ m/s para un estado tensional de 436 kPa. Al incrementar la carga a 856 kPa dicho valor se redujo a $1,7 \times 10^{-7}$ m/s. Tendencias similares se obtuvieron en todas las muestras con los incrementos de carga.
 - Para un mismo estado tensional, a medida que el periodo de almacenamiento crece, la conductividad hidráulica se reduce. Para un estado tensional de 856 kPa, la muestra analizada con lixiviado natural al momento del moldeo arrojó valores de conductividad hidráulica de $2,1 \times 10^{-6}$ m/s. Con el mismo estado tensional, muestras analizadas al cabo de 7, 28 y 56 días de almacenamiento adoptaron valores de conductividad de $1,4 \times 10^{-6}$, $2,7 \times 10^{-7}$ y $2,4 \times 10^{-8}$ m/s respectivamente.

Se detectó que el potencial de expansión de las partículas de bentonita se encuentra limitado por la presencia de sales en la escoria, verificado a partir de ensayos de expansión libre. Se detectó que la influencia de las sales en este comportamiento puede eliminarse lavando las mismas.

- ✓ Muestras gemelas preparadas al 90% EC con escorias comunes y escorias lavadas arrojaron valores de conductividades de $1,20 \times 10^{-8}$ m/s y $8,78 \times 10^{-9}$ m/s respectivamente. Muestras compactadas al 100% EC mostraron mayor variación, adoptando valores medios de $5,97 \times 10^{-9}$ m/s en el caso de prepararlas con escorias comunes y $9,71 \times 10^{-10}$ m/s con escorias lavadas. Esto corrobora los resultados de expansión libre analizados, siendo que la presencia de sales en las escorias limita el comportamiento expansivo de las arcillas.
- ✓ Reduciendo la presencia de sales presentes en las escorias que inhiben el comportamiento expansivo de las arcillas se logra cumplir con los

requerimientos estipulados en la normativa para la barrera de fondo en un relleno sanitario. Los valores de conductividad hidráulica medidos permitieron detectar que el fenómeno de expansión de las partículas de bentonita al entrar en contacto con el fluido intersticial permite lograr conductividades menores a 1×10^{-9} m/s.

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA FUTURAS

INVESTIGACIONES

8.1 CONCLUSIONES

El sedimento loésico que cubre el centro de Argentina se caracteriza por depositarse de manera suelta presentando abundantes macroporos. El mismo presenta una cementación inter-partícula ligera, la cual se ve condicionada por cambios de humedad y modificaciones en su estado tensional, manifestando un comportamiento colapsable. En esta Tesis se investigó la posibilidad de estabilizar los suelos locales a partir de la adición de escorias siderúrgicas, remanentes en el sistema de producción del acero. Se estudiaron los mecanismos de reacción que fomentan la estabilización del mismo a partir de reacciones puzolánicas analizando tanto el comportamiento microscópico como macroscópico de las muestras estabilizadas. Para cumplir con los objetivos se emplearon diversas metodologías de ensayo que permitieron obtener resultados confiables y novedosos. Las principales conclusiones obtenidas de este trabajo se detallan a continuación.

a) En relación al mecanismo inter-partícula que regula el comportamiento relacionado al desarrollo de reacciones puzolánicas en la microestructura de la muestra:

Se demostró que la adición de escorias en limos loésicos compactados genera la cementación de las partículas a través de reacciones de tipo puzolánico. El limo del centro de Argentina presenta un elevado contenido de sílice amorfa, necesario para que las reacciones de este tipo ocurran. Se cuantificó la puzolanidad de este sedimento demostrando que presenta una actividad puzolánica elevada ($IP > 1,2$). Las escorias siderúrgicas, en cambio, presentan nula actividad puzolánica. Se demostró que la función de las mismas en las reacciones estudiadas a corto plazo, se vincula a la generación de un ambiente alcalino que tienda a favorecer el desarrollo de las mismas.

La interacción de las partículas de limo-escoria genera como resultado la formación de hidrogeles, conocidos como silicatos o aluminosilicatos de calcio hidratados. El monitoreo de la formación de los mismos en las muestras estabilizadas es posible debido al éxito de la metodología aplicada para su identificación. Existe un fenómeno de densificación, el cual ocurre a medida que las mismas envejecen. En esta tesis se demostró el éxito de realizar observaciones en microscopia confocal, que permitieron mostrar que, a medida que el periodo de almacenamiento se incrementa, se reducen los espacios porales disponibles originalmente en la muestra. Esta reducción se vincula a la disminución del 70% en la profundidad de poros observada al cabo de 56 días de almacenamiento. El procedimiento desarrollado nunca antes había sido utilizado para evaluar la formación de hidrogeles en los poros de un medio granular.

Por otro lado, el desarrollo de productos de hidratación se monitoreó a partir de imágenes SEM. Con este estudio se demostró por primera vez que las reacciones de interacción y formación de hidrogeles comienzan a desarrollarse en proximidades de las partículas de escoria, donde el ambiente presenta mayor alcalinidad. Se forma un halo alrededor de las partículas de escoria, denominado borde de reacción, el cual cementa las partículas vecinas. Se propuso una metodología que permite identificar la interacción entre las partículas de escoria y el limo loésico, con la generación de los bordes de reacción a partir de análisis petrográfico y mapas composicionales. Se demostró que a medida que la reacción puzolánica evoluciona se forman los hidrogeles mencionados, generando la cementación de las partículas detectada en los cortes delgados analizados a partir de microscopia confocal, SEM y análisis petrográfico. Esto se traduce a la evolución hacia una microestructura con un mejor arreglo microscópico que presenta mayor uniformidad y homogeneidad.

b) En cuanto a cambios en las propiedades granulométricas debido a formación de productos de hidratación:

El proceso de cementación que ocurre con el paso del tiempo en las muestras estabilizadas genera cambios granulométricos. Los hidrogeles que se forman, encargados de reducir la porosidad efectiva de las muestras, provoca que los diámetros

nominales de las mezclas se modifiquen. Al cabo de 365 días la cementación produce que el diámetro nominal D30 de la mezcla sea 15 veces superior que al momento inicial de la muestra. El diámetro nominal D60 presenta modificaciones similares resultando ser 8 veces mayor al cabo de 1 año de almacenamiento. La tendencia indica que a medida que la muestra envejece disminuye la proporción de partículas finas disponibles en las muestras. Las variaciones detectadas confirman que la reducción de espacios porales en las muestras es consecuencia de los cambios que sufren las muestras a nivel de contactos entre partículas, transformando su clasificación unificada de suelos predominantemente fino a un suelo granular grueso (SP) a medida que avanza el tiempo de curado o de reacción.

c) En cuanto al efecto de las reacciones puzolánicas sobre el comportamiento macroscópico y variaciones en la resistencia de los limos compactados y estabilizados:

La adición de escorias en distintas proporciones provoca mejoras en el comportamiento mecánico. Las mismas se detectan a partir de incrementos en la resistencia de las muestras de limo-escoria y limo-escoria-bentonita.

Las mezclas de limo estabilizadas con escorias duplican su resistencia a compresión no confinada al cabo de 7 días de almacenamiento. Esta mejora resulta significativamente mayor cuando el limo se estabiliza con 12% de adiciones, la cual duplica su resistencia máxima en ese periodo. Se demostró que la tendencia de mejorías resulta continua en el tiempo y que es un proceso relativamente lento, lo cual es característico de las reacciones de tipo puzolánicas responsables de una cementación natural dentro de las muestras. En correspondencia con la evolución de las reacciones puzolánicas, se identifica que al cabo de 56 días la muestra con 12% de adiciones incrementa aproximadamente 5 veces su resistencia máxima. Al cabo de 365 días los valores alcanzados logran superar los valores de resistencia obtenidos para muestras de limo-3% cemento al cabo de 28 días de almacenamiento.

La humedad de amasado juega un rol fundamental en las mejoras mecánicas de los limos estabilizados con 12% de escorias. Se observa que las muestras con contenido de humedad mayor al contenido óptimo manifiestan incrementos insignificantes en su resistencia mostrando un comportamiento dúctil. Sin embargo, cuando las muestras se compactan en la rama seca de la curva de compactación, los incrementos de resistencia superan en un 25% los valores obtenidos en muestras analizadas con el contenido de humedad óptimo, a pesar de que esta última presenta una densidad seca mayor. El comportamiento detectado resulta similar al de un suelo fino, lo cual verifica que el proceso de cementación se encuentra gobernado por la cementación del limo loésico que ocurre debido al ambiente alcalino que generan las escorias.

La adición de bentonita en un 6% en las muestras estabilizadas favorece la mejora mecánica analizada, siendo que el proceso de cementación continúa gobernando el proceso de estabilización. Los resultados obtenidos demostraron que la resistencia de la mezcla con bentonita se incrementa 5,5 veces al cabo de 56 días de almacenamiento superando la mejora detectada en la mezcla limo-escoria. En todos los casos, los incrementos observados se encuentran vinculados al aumento del número de contacto entre partículas debido al desarrollo de hidrogeles que cementa la interfaz de la muestra. En el caso de la muestra de bentonita se genera, además, un fenómeno de cohesión aparente debido a la disminución de fuerzas repulsivas netas. Esto se traduce a resistencias levemente mayores.

d) En relación al efecto de la cementación en la rigidez

Se demostró que la incorporación de escorias en los limos compactados y limo-bentonita compactada permite obtener un material cuya rigidez aumenta de manera significativa con el paso del tiempo. El módulo de elasticidad de las muestras analizadas muestra tendencias crecientes con el tiempo, indicando que a mayor periodo de almacenamiento las muestras soportan mayores presiones adoptando menores niveles de deformación. Al cabo de 56 días de almacenamiento el módulo de deformación se incrementa 500% en el caso de la muestra de limo-escoria y un 425% en el caso de limo-escoria-bentonita.

Los incrementos de rigidez con el envejecimiento de las muestras se manifiestan en cambios en el índice de compresibilidad de muestras estabilizadas e incrementos en la presión de fluencia en las mismas. A mayores periodos de almacenamiento se observan disminuciones del 30% en el índice de compresión en las muestras de limo-escoria al cabo de 56 días, siendo que al cabo de 1 año esta disminución resulta del 50%. Estas variaciones resultan del 20% en el caso de adicionar 6% de bentonita en las mezclas con 12% de escoria. En ambos casos se detectaron incrementos de un 75% aproximadamente en las presiones de fluencia de las muestras envejecidas, siendo que la misma se incrementa desde valores aproximados de 60 kPa hasta 105 kPa al cabo de 56 días de almacenamiento.

Se demostró que el cambio detectado en el comportamiento tenso-deformacional resultó ser típico de un material gobernado por procesos de cementación, generando incrementos tanto de resistencia como de rigidez. A medida que las reacciones puzolánicas se desarrollan en el interior de las muestras, se incrementan las uniones y número de contactos entre partículas. Este proceso resulta en que, a mayor periodo de curado, la presión aplicada se distribuya de manera más uniforme resultando en menores niveles de deformación para una misma carga. Es importante destacar que los aportes en relación a este aspecto abren nuevas posibilidades de utilizar las escorias siderúrgicas para la estabilización de suelos en múltiples aplicaciones geotécnicas que permitiría el reemplazo parcial de otros agentes cementantes menos amigables con el ambiente que son frecuentemente utilizados en las construcciones civiles.

e) En relación a productos de hidratación en el comportamiento hidráulico de las muestras analizadas:

De acuerdo a los ensayos de microscopia, la generación de hidrogel producto de las reacciones puzolánicas se encarga de reducir la porosidad efectiva de las muestras con el paso del tiempo. Se demostró que la ocupación parcial de los vacíos del suelo por los hidrogel se traduce en disminuciones en la conductividad hidráulica de un orden de magnitud cuando se ensayan muestras compactadas al 90% de la energía de compactación y al cabo de 56 días de almacenamiento.

Estos productos de hidratación que cementan partículas generan vínculos resistentes y obstruyen el flujo de líquidos dentro de los poros del limo-escoria y limo-bentonita-escoria compactados. Es importante destacar que se demostró por primera vez que estos vínculos son estables en presencia de fluidos permeantes con elementos químicos en altas concentraciones como son los lixiviados naturales de un relleno sanitario. Como consecuencia, los cambios de conductividad hidráulica detectados con el envejecimiento de las mezclas con escorias se mantienen a lo largo del tiempo analizado (5 meses).

La presencia de 6% de bentonita en las mezclas limo-escoria manifiesta variaciones insignificantes respecto al comportamiento hidráulico detectado en las muestras sin adiciones de arcilla. Este fenómeno se encuentra ligado a que el comportamiento expansivo de las arcillas se ve condicionado por la presencia de sales en las escorias siderúrgicas. Sin embargo, realizando un proceso de lavaje previo a la utilización de las escorias se logró controlar este efecto. Los experimentos realizados permitieron demostrar que con el lavado previo de las escorias se logra reducir la conductividad hidráulica en muestras compactadas al 90% de la energía de compactación en un orden de magnitud.

La energía de compactación empleada, por otro lado, juega un rol importante en la conductividad hidráulica. A mayor energía de compactación, la variación obtenida en las muestras preparadas con escorias lavadas es mayor. En el caso de la muestra preparada con escorias comunes la conductividad hidráulica se reduce un 50% debido a cambios en la densidad relativa de la muestra. Al reducir la presencia de sales en las escorias la reducción debido a cambios en la densidad relativa de la muestra resulta del 100%. Dicho fenómeno se encuentra asociado a que, ante una menor relación de vacíos inicial el fenómeno de expansión de las partículas de arcilla resulta de mayor significancia. Para el 100% de energía de compactación, la conductividad hidráulica de las muestras preparadas con escorias lavadas resulta 16 veces menor a la conductividad obtenida en la muestra con escorias utilizadas sin tratamiento previo.

f) En relación al comportamiento mecánico-hidráulico acoplado en muestras estabilizadas y cementadas:

El incremento de presión genera reducciones en la conductividad hidráulica de las muestras sometidas a presión confinada. En una primera instancia este fenómeno se relaciona con la reducción de los espacios vacíos de las muestras a medida que las partículas se reacomodan debido al incremento de carga. Sin embargo, a medida que las muestras envejecen, esta reducción en la relación de vacíos debido a aumentos de presión resulta significativamente de menor magnitud. Se demostró por lo tanto que los productos de hidratación provocan la cementación de partículas, debido a la mayor rigidez antes mencionada se reducen los cambios en la relación de vacíos al someter las muestras a incrementos de presión, pero los vacíos efectivos disponibles para el flujo se ven significativamente reducidos por la presencia de los hidrogeles. Esto deriva en un proceso de colmatación física que dificulta la movilidad del líquido permeante en los poros libres de hidrogeles.

En las muestras de limo-escoria sin productos de hidratación, las variaciones observadas en conductividades hidráulicas se encuentran justificadas en un 30% debido a cambios en el factor de forma de poros de la muestra (C_s). Sin embargo, a medida que la muestra envejece desarrollando hidrogeles, los cambios en el factor de forma sólo permite justificar reducciones de conductividad hidráulica en aproximadamente un 0,3%. Este resultado implica que los cambios físicos, tales como variaciones en la tortuosidad, permiten explicar cambios de hasta un orden de magnitud en las muestras estabilizadas. Por lo tanto, se pudo demostrar a partir de los resultados obtenidos en las investigaciones doctorales que las variaciones de conductividad hidráulica pueden ser explicadas únicamente por la reducción en la porosidad efectiva al desarrollarse los hidrogeles dentro de los poros del suelo compactado.

Los resultados obtenidos indican que el suelo limoso puede ser estabilizado a partir de la adición de escorias siderúrgicas, las cuales fomentan el desarrollo de reacciones puzolánicas que se desarrollan en las muestras compactadas. Esto provoca mejoras en el comportamiento mecánico e hidráulico del sedimento. Además, la adición de un 6%

de bentonita en mezclas preparadas con el 100% de la energía de compactación permiten cumplir los requerimientos impuestos por la normativa que regula el diseño de las barreras impermeables en rellenos sanitarios. Esto indica que el limo estabilizado resulta compatible para tal fin, siendo que los hidrogeles que se desarrollan resultan de carácter permanente al ser permeados con líquidos que presentan elementos químicos en altas concentraciones como son los lixiviados naturales de un relleno sanitario.

8.2 RECOMENDACIONES PARA FUTUROS ESTUDIOS

A partir de los resultados analizados y discutidos en esta Tesis se considera necesario continuar profundizando el estudio sobre los suelos estabilizados con escorias siderúrgicas. Sería interesante evaluar el comportamiento mecánico de muestras con distintas dosificaciones de escoria-bentonita determinando la relación óptima de las mismas para estabilizar suelos de origen loésico. Se recomienda realizar estudios para determinar la composición química del hidrogel formado durante las reacciones puzolánicas analizando, a su vez, los cambios que ocurren en la porosimetría de las muestras debido a estos procesos.

Se recomienda para futuros estudios evaluar cuantitativamente los efectos que generan las sales presentes en las escorias en el comportamiento mecánico-hidráulico acoplado. De manera similar, a partir de las determinaciones de dosajes óptimos se propone el estudio de la aptitud del material para la construcción de una barrera de fondo en un relleno sanitario. En este aspecto resultaría significativo conocer el comportamiento químico de la misma y determinar la capacidad de retención de iones metálicos con el objeto de cuantificar si la presencia de hidrogeles pudiera favorecer o perjudicar la adsorción y retención de contaminantes dentro de la barrera. Resultaría de interés, además, conocer la interacción de la formación de hidrogeles con distintos fluidos permeantes como ser, por ejemplo, hidrocarburos y/o contaminantes orgánicos miscibles con el agua.

Se considera de fundamental importancia, además, verificar el comportamiento triaxial de las mezclas, con el objeto de poder cuantificar el cambio de rigidez y posibles

comportamientos de pico asociados a un material frágil o falla frágil en medios granulares.

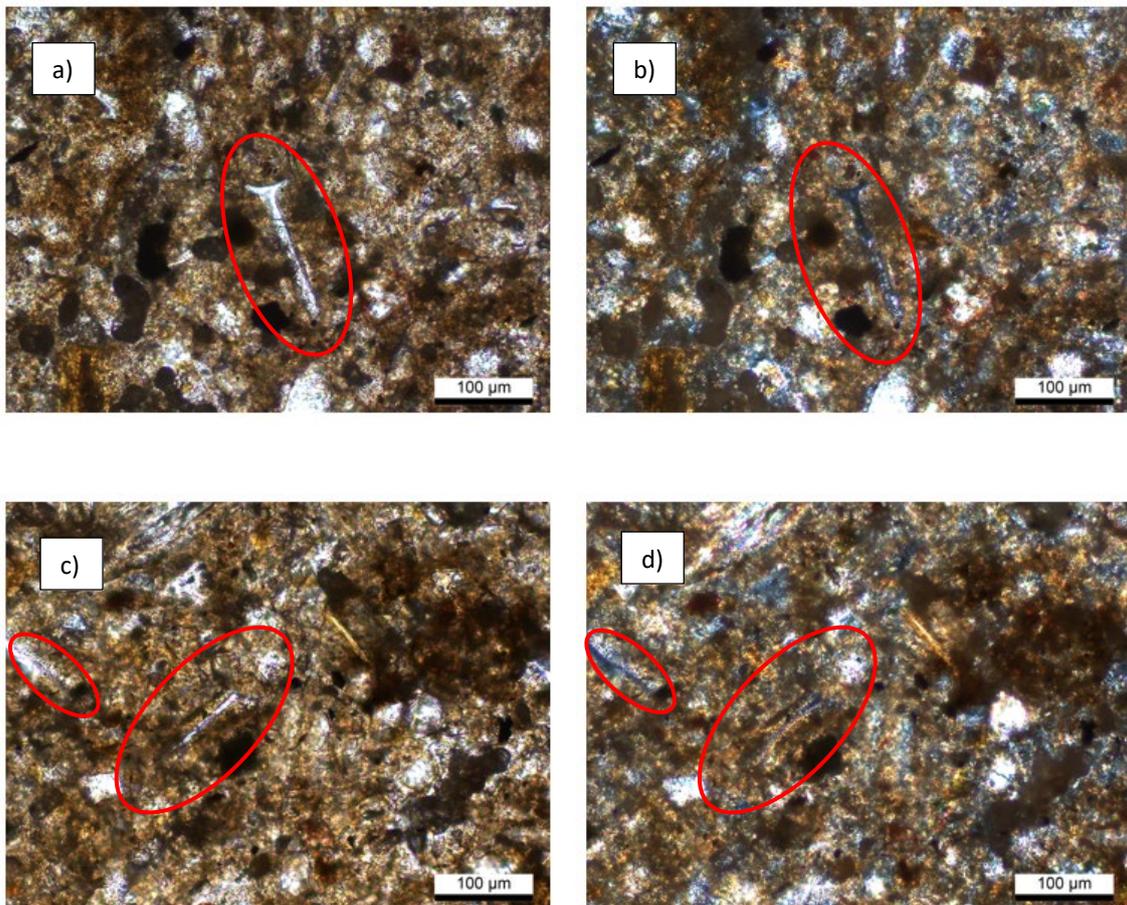
A su vez, se recomienda estudiar la estabilidad diferida en el tiempo de las escorias, investigando la posibilidad de que sufran procesos de envejecimiento a largo plazo que pudieran influir en el efecto producido por los procesos de cementación que ocurren en las muestras. A su vez, se recomienda estudiar la influencia de la granulometría de las escorias en las muestras estabilizadas, evaluando la posibilidad de trabajar con fracción fina de las mismas.

Sería interesante realizar un estudio exhaustivo con respecto a las ventajas ambientales que produciría la minimización del consumo de materiales aglutinantes como cemento y cal, producto de la implementación de las escorias como agentes estabilizadores. En este marco, la disminución de la huella de carbono asociada a la reutilización de las escorias requeriría un análisis propio donde se puedan analizar los cambios a nivel de producción de cada producto.

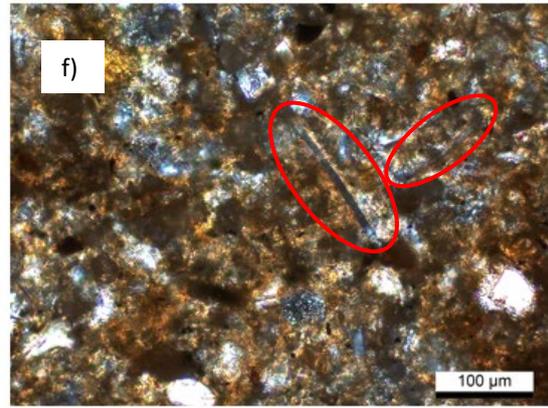
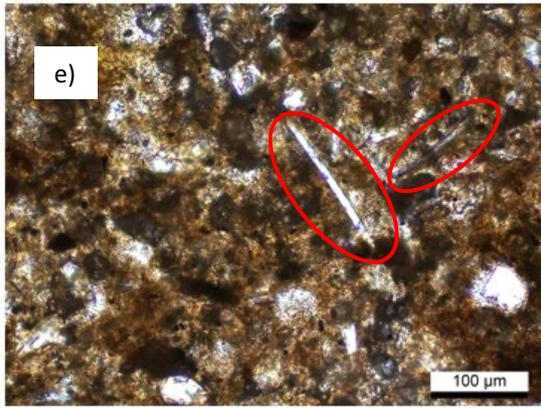
ANEXO I

IMÁGENES DEL ANALISIS MICROSCOPICO

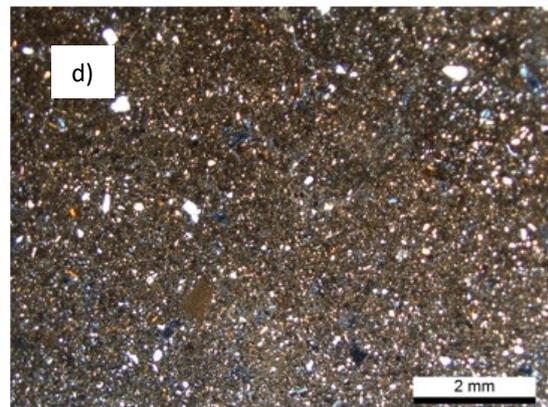
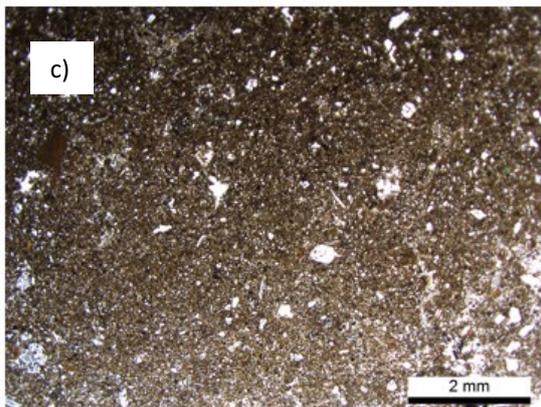
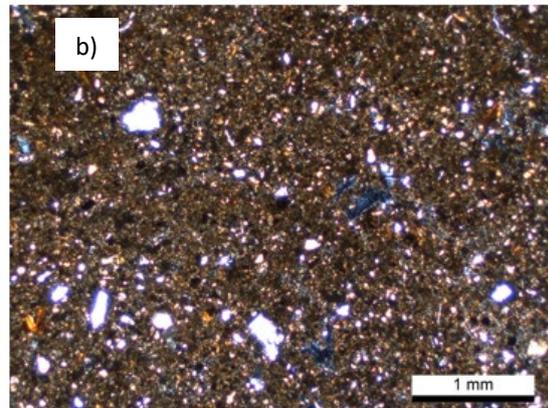
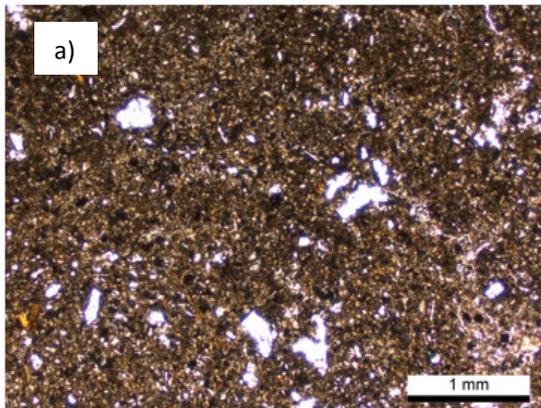
A. MUESTRAS DE LIMO EN MICROSCOPIA ÓPTICA DE POLARIZACIÓN



1. 1 Fotomicrografías. Trizas volcánicas (elipses rojas) en corte delgado de limo, a nicoles paralelos (a y c) y nicoles cruzados (b y d).

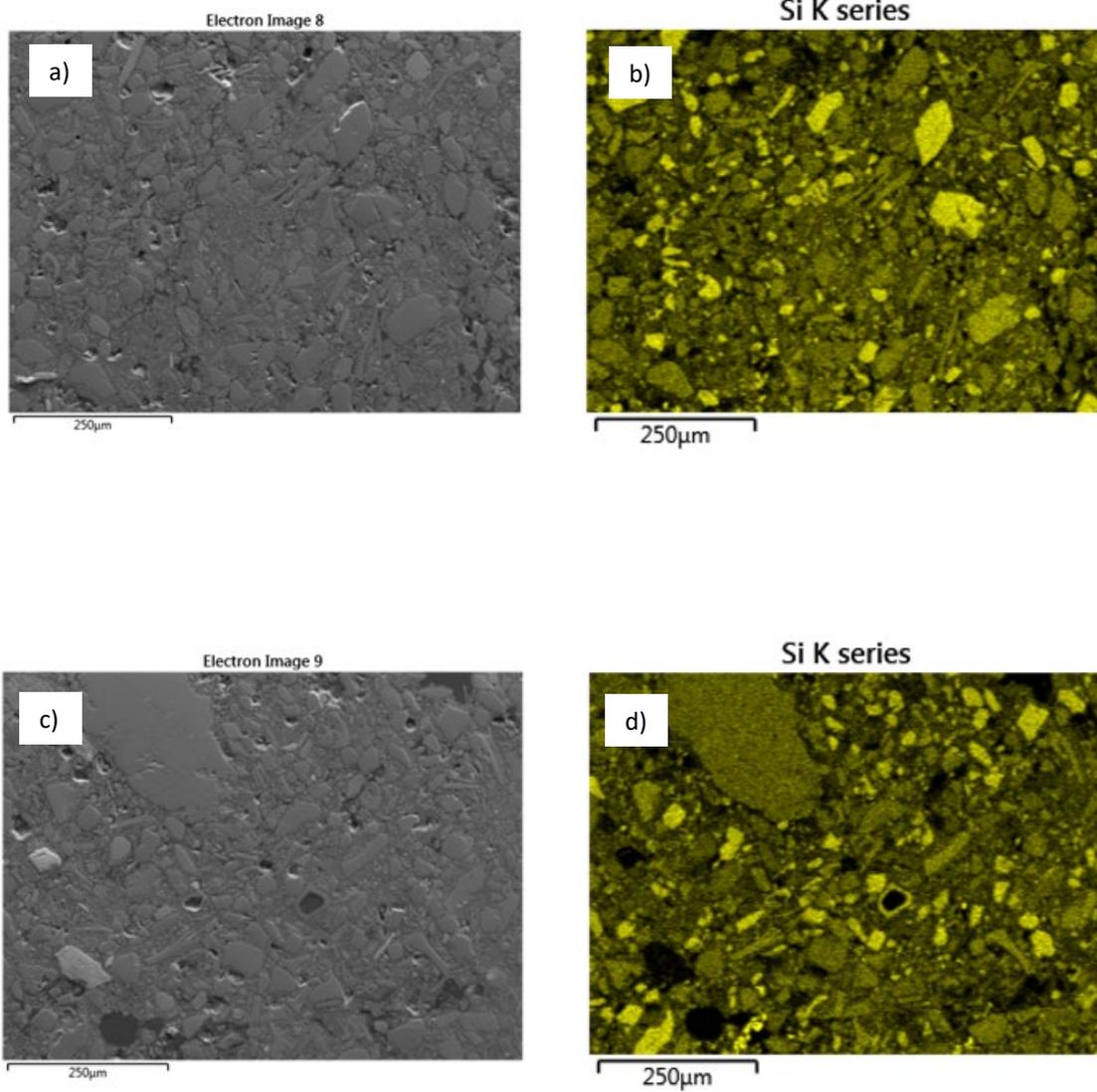


1. 2 Fotomicrografías. Trizas volcánicas (elipses rojas) en cortes delgados de limo, a nicoles paralelos (e) y nicoles cruzados (f).



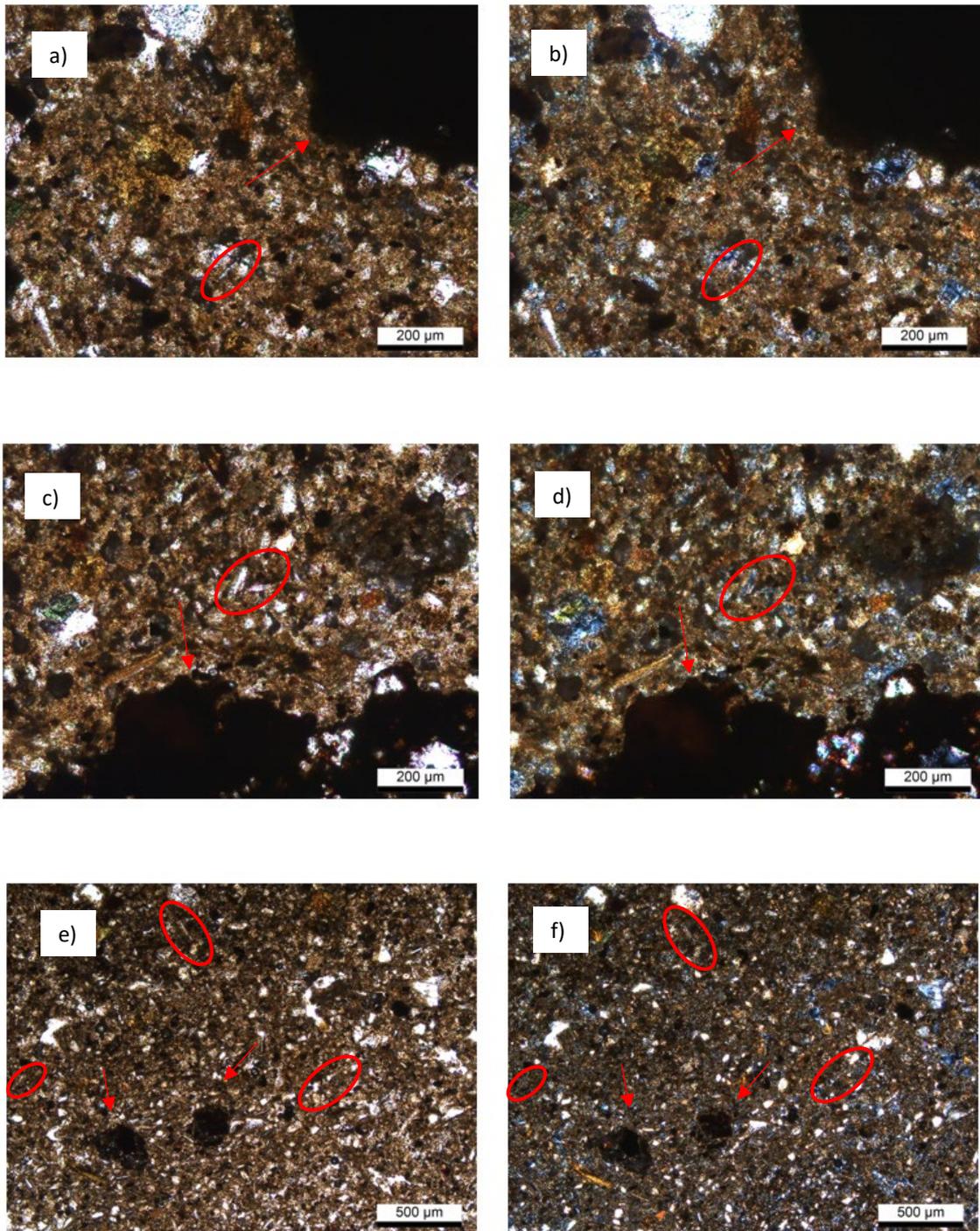
1. 3 Fotomicrografías. Cortes delgados de limo compactado a distintas escalas limo, a nicoles paralelos (a y c) y nicoles cruzados (b y d).

B. MAPAS COMPOSICIONALES DE Si EN MUESTRAS DE LIMO



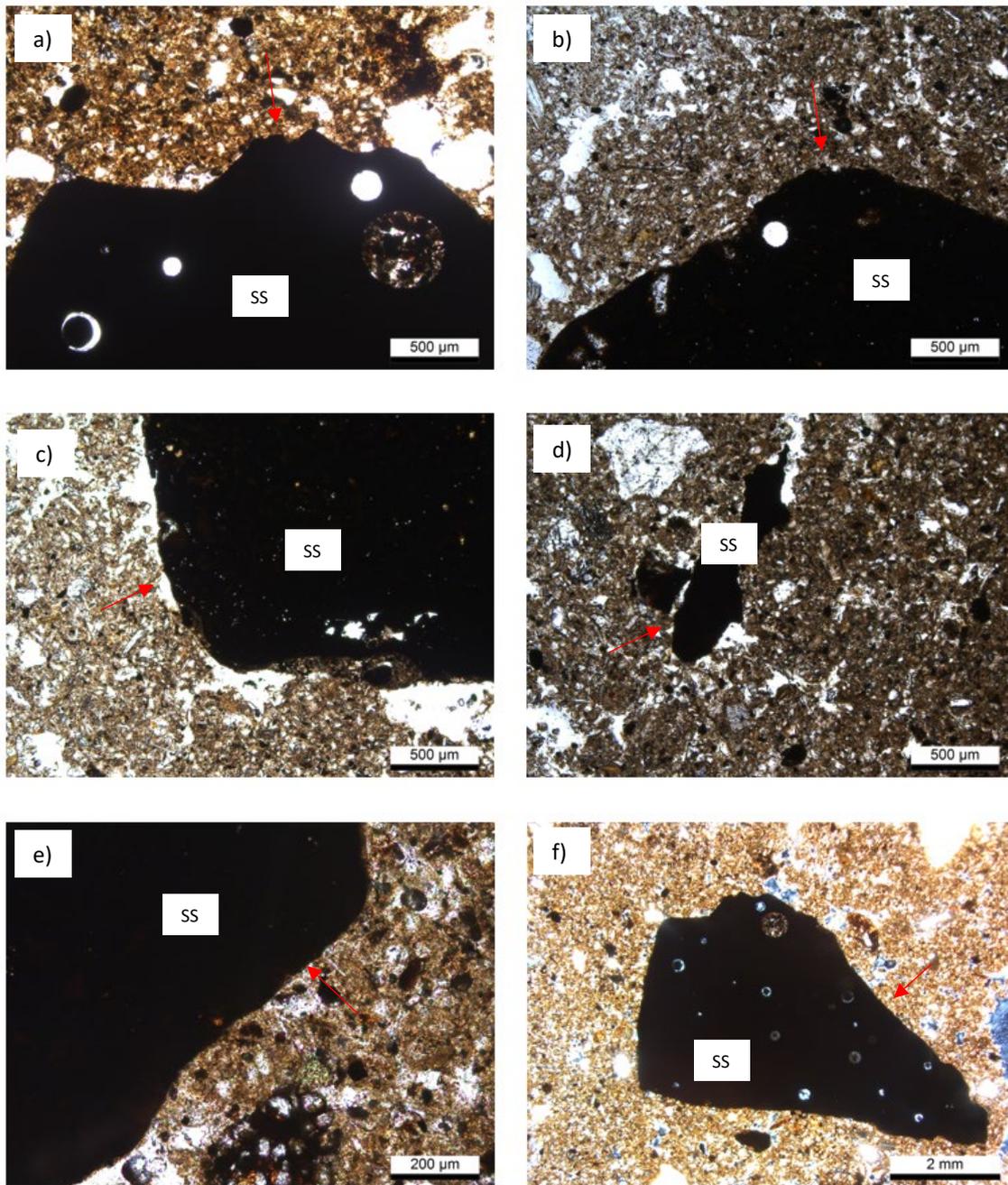
1. 4 SEM-EDS. a y c) Cortes delgados de limo a 0 días de almacenamiento (imágenes de electrones secundarios). b y d) Mapas composicionales de Si correspondientes a las imágenes "a" y "b".

C. IDENTIFICACIÓN TRIZAS VOLCÁNICAS POR MICROSCOPIA ÓPTICA DE POLARIZACIÓN EN MUESTRAS ESTABILIZADAS CON ESCORIAS

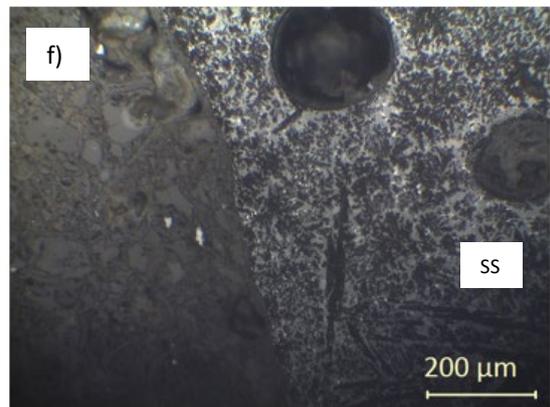
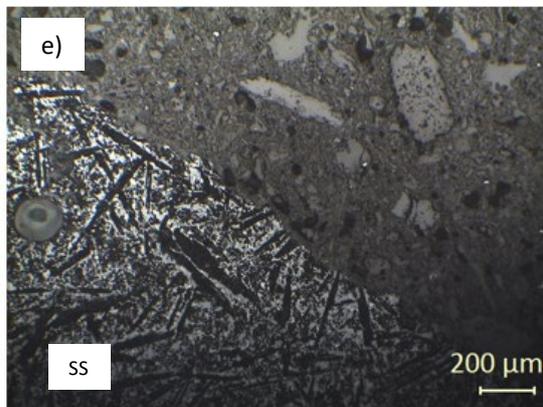
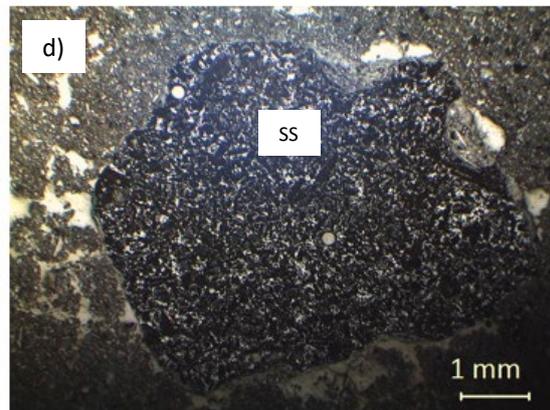
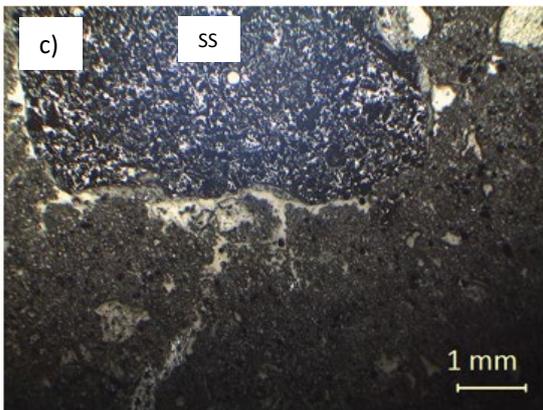
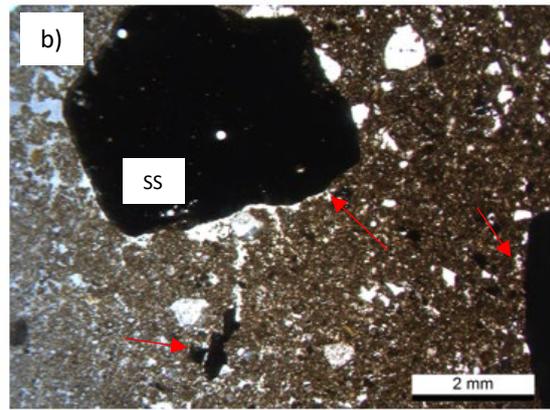
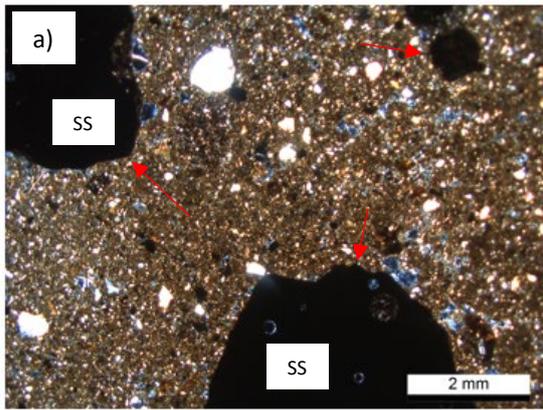


1. 5 Fotomicrografías. Partículas de escorias (flecha roja) inmersas en matriz de loess a distintas escalas e identificación de trizas volcánicas en las mismas (elipse roja), a nicoles paralelos (a, c y e) y nicoles cruzados (b, d y f).

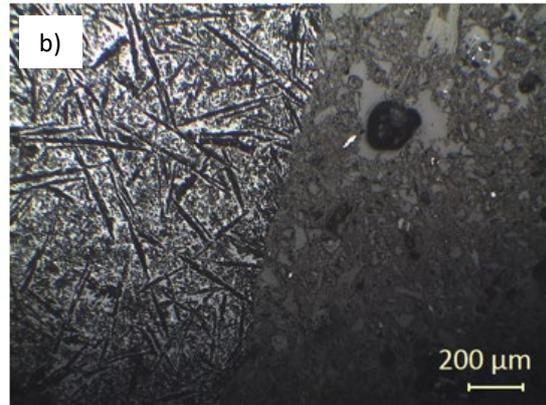
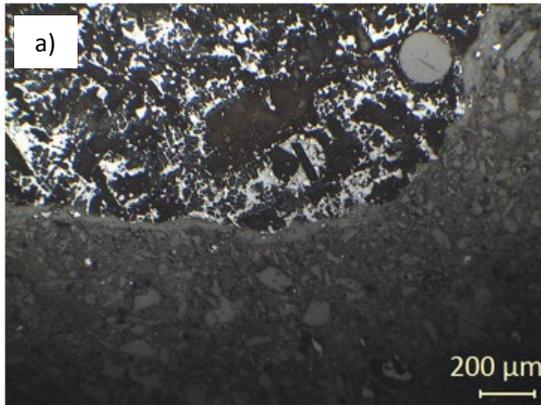
D. IDENTIFICACIÓN DE PARTÍCULAS DE ESCORIA EN MUESTRAS DE LIMO
COMPACTADA A 0 DÍAS POR MICROSCOPIA ÓPTICA DE POLARIZACIÓN



1. 6 Fotomicrografías. Márgenes de partículas de SS (flecha roja) en muestras L-12% SS a distintas escalas, a nicoles paralelos (a, c y e) y nicoles cruzados (b, d y f).

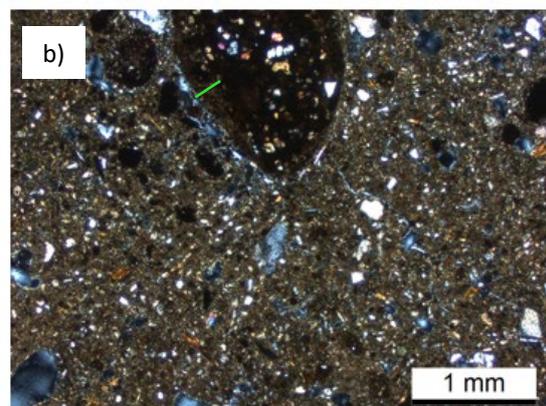
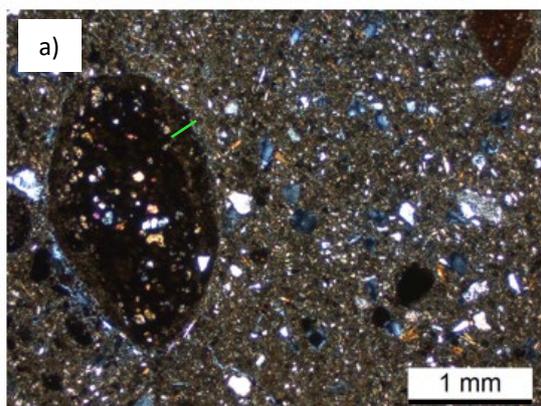


1. 7 Fotomicrografías. a) Partículas de escoria en la muestra L-12% SS, compactada a 0 días (nicos cruzados). b) Otro sector de la misma muestra a nicos paralelos. c y d) Detalles del mismo sector en "b" tomados con luz reflejada. e y f) Detalles de la zona de contacto SS-L en la misma muestra tomada con luz reflejada.

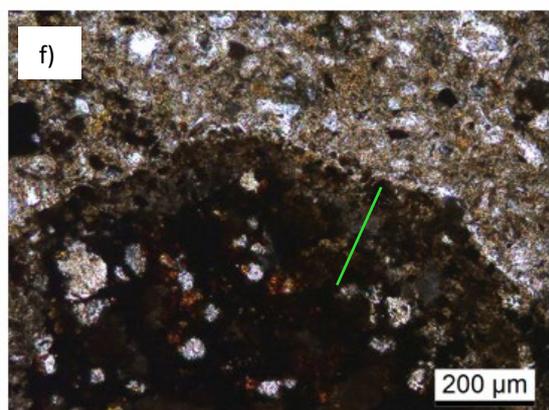
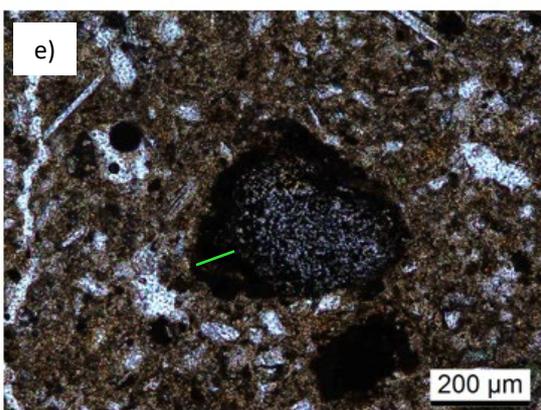
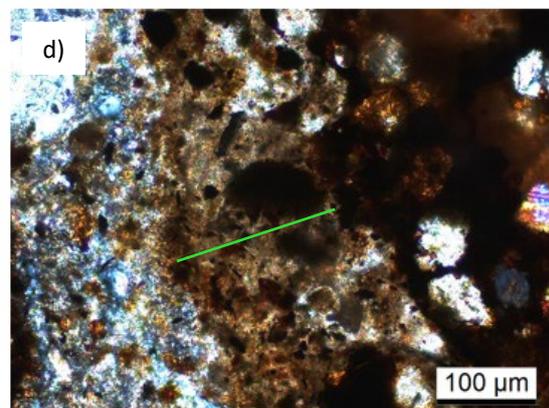
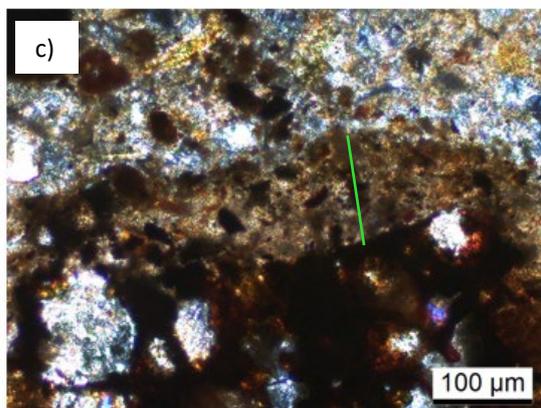
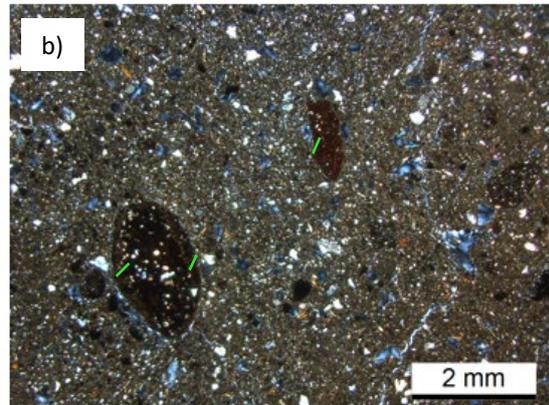
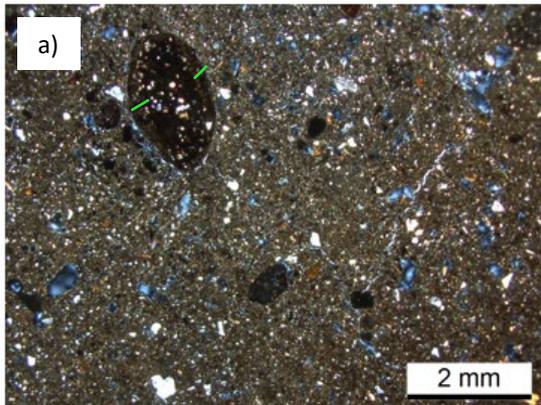


1. 8 Fotomicrografías. a y b) Detalles de la zona de contacto entre partículas en muestra L-12% SS tomadas con luz reflejada.

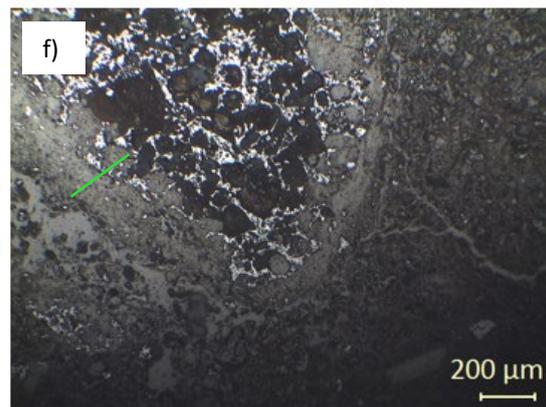
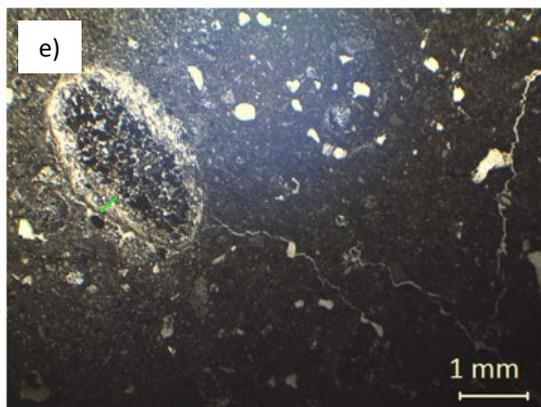
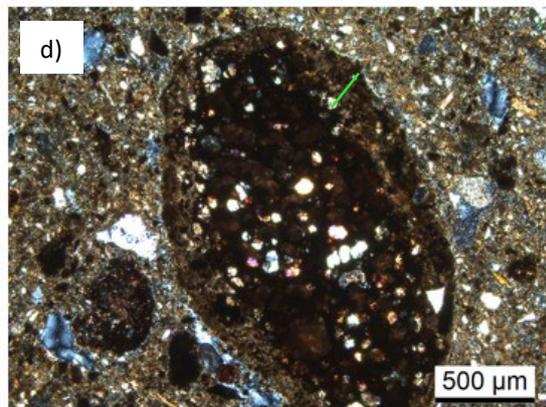
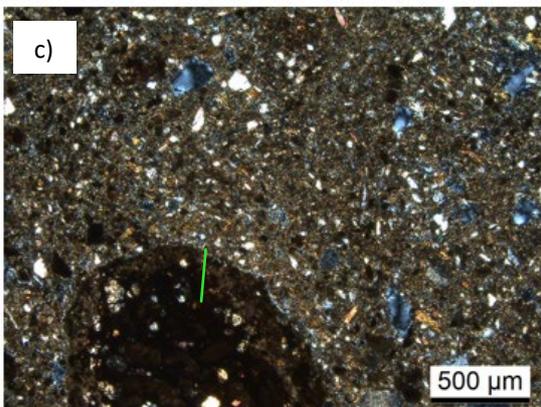
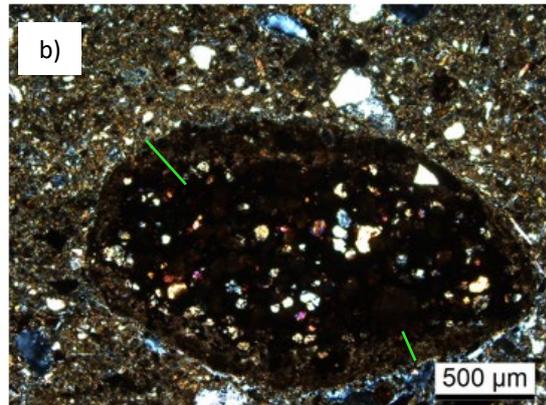
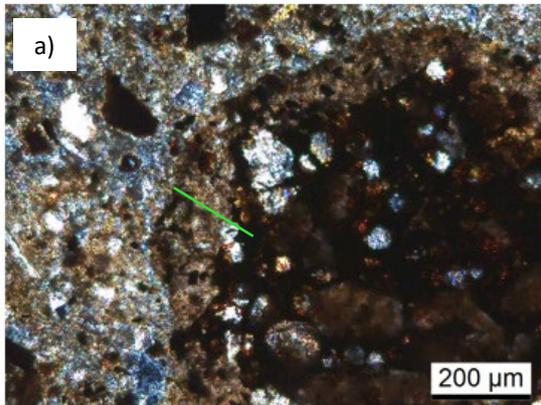
E. IDENTIFICACIÓN DE PARTÍCULAS DE ESCORIA EN MUESTRAS DE LIMO COMPACTADA A 56 DÍAS POR MICROSCOPIA ÓPTICA DE POLARIZACIÓN



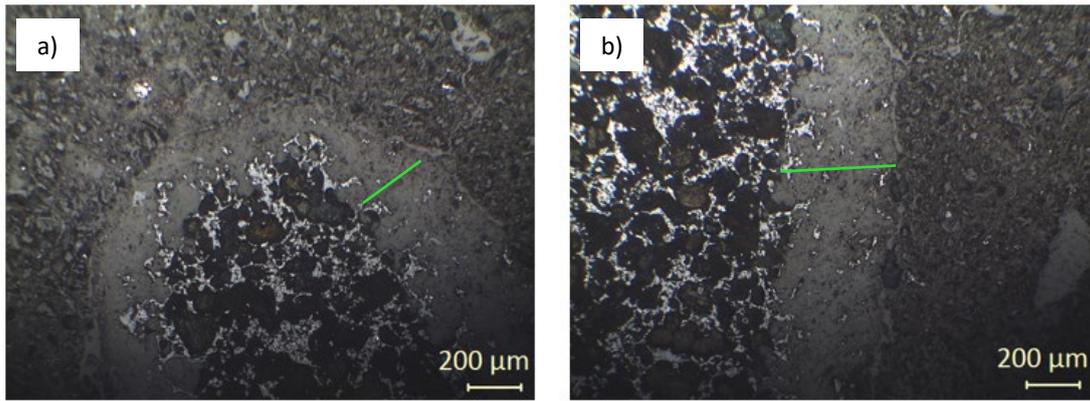
1. 9 Fotomicrografías. ay b) Partículas de escoria en la muestra L-12% SS, con 56 días de almacenamiento, a nicoles cruzados. La línea verde indica el sector de reacción de borde.



1. 10 Fotomicrografías. Partículas de escoria en la muestra L-12% SS, con 56 días de almacenamiento a distinta escala. A, b, c y d) a nicoles cruzados. e y f) a nicoles paralelos. La línea verde indica el sector de reacción de borde.

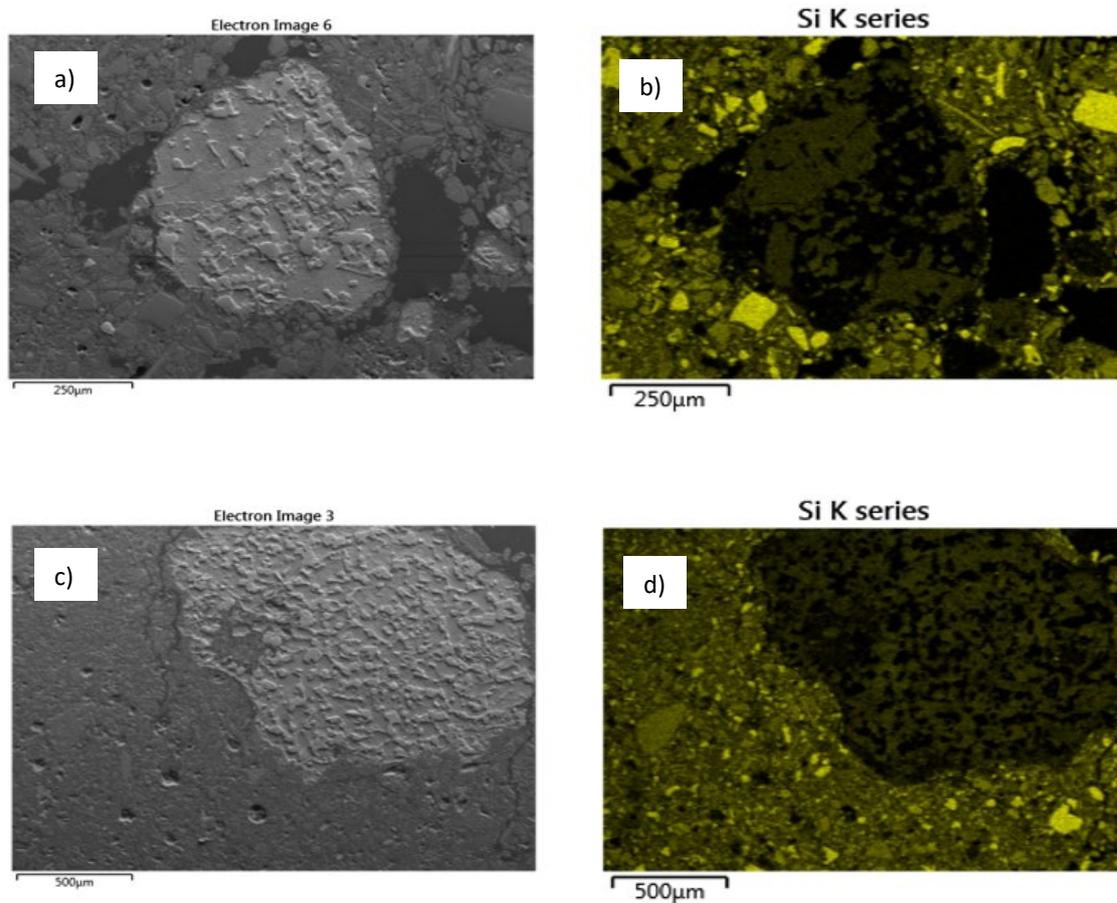


1. 11 Fotomicrografías. Partículas de escoria en la muestra L-12% SS, compactada a 56 días a nicoles cruzados (a, b c y d). e y f) Detalles de la zona de contacto SS-L en la misma muestra tomada con luz reflejada. La línea verde indica el sector de reacción de borde.



1. 12 Fotomicrografías. a y b) Detalles de la zona de contacto entre partículas en muestra L-12% SS a 56 días de curado, tomadas con luz reflejada. La línea verde indica el sector de reacción de borde.

F. MAPAS COMPOSICIONALES DE SILICIO A PARTIR DE IMÁGENES SEM EN MUESTRAS ESTABILIZADAS



1. 13 SEM-EDS. a y c) Cortes delgados de muestra L-12% SS a 56 días de almacenamiento (imágenes de electrones secundarios). b y d) Mapas composicionales de Si correspondientes a las imágenes "a" y "b".

ANEXO II

A. FACTOR DE FORMA DE POROS CS

2. 1 Factores de forma CS, para cada estado tensional y en cada muestra analizada.

f(t)						
t [d]	q [kPa]	Cs	Mín.	Máx.	Cs(f)-Cs(o)	ΔCs
0	28,4373	1,78E-04	4,91E-05	1,78E-04	1,29E-04	2,76E-01
	56,3551	1,39E-04				
	109,4640	7,67E-05				
	218,7980	5,35E-05				
	436,0380	5,36E-05				
	855,3250	4,91E-05				
7	28,4373	9,41E-05	1,82E-05	9,41E-05	7,59E-05	1,93E-01
	56,3551	5,10E-05				
	109,4640	4,73E-05				
	218,7980	2,81E-05				
	436,0380	2,36E-05				
	855,3250	1,82E-05				
28	28,4373	6,89E-05	2,84E-06	6,89E-05	6,61E-05	4,11E-02
	56,3551	3,88E-05				
	109,4640	3,96E-05				
	218,7980	2,92E-05				
	436,0380	7,61E-06				
	855,3250	2,84E-06				
56	28,4373	2,78E-05	3,07E-07	2,81E-05	2,78E-05	1,09E-02
	56,3551	2,81E-05				
	109,4640	1,38E-05				
	218,7980	5,37E-06				
	436,0380	1,02E-06				
	855,3250	3,07E-07				
365	28,4373	1,47E-05	4,09E-08	1,47E-05	1,46E-05	2,79E-03
	56,3551	1,14E-05				
	109,4640	6,99E-06				
	218,7980	2,78E-06				
	436,0380	2,98E-07				
	855,3250	4,09E-08				

ANEXO III

PRODUCCIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA ASOCIADA A LA TESIS

Artículos publicados en revistas científicas indexadas

- [1] **Mozejko C.A.**, Francisca F.M., 2020; “Enhanced mechanical behavior of compacted clayey silts stabilized by reusing steel slag”. *Construction and Building Materials*, 117901.
- [2] Francisca F.M., **Mozejko C.A.** (2022), “Hydraulic and mechanical behavior of compacted silts modified by waste steel slag”, *Geomechanics for Energy and the Environment*, 100323.

Capítulos de libro en editorial internacional

- [3] Francisca F.M., **Mozejko C.A.**, Glatstein D.A., “Mechanical, Hidraulic and Chemical Behavior of Steel Slag Amended Loessical Silt Bentonite Liners”: *Sustainable Environmental Geotechnics*, pp. 337 – 381, Springer, Cham.

Artículos publicados en memorias de congresos nacionales

- [4] **Mozejko, C.A.**, Francisca, F.M., 2018; “Caracterización mecánica de los suelos loésicos de Córdoba estabilizados con Escorias Siderúrgicas”. XXIV Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (CAMSIG) 2018, Salta, Argentina.
- [5] **Mozejko, C.A.**, Francisca, F.M., 2021; “Estabilización mecánica-hidráulica de suelos loésicos compactados mediante la adición de escorias siderúrgicas”. XXV Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (CAMSIG) 2021, Posadas, Misiones, Argentina.

Artículos en preparación

- [6] **Mozejko C.A.**, Francisca F.M., “Mechanical and Hydraulic Behavior of Steel Slag Amended Loessical Silt Bentonite”: en preparación para ser enviado a publicación.

BIBLIOGRAFÍA

Abdel-Shafy, H. I., & Mansour, M. S. (2018). Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. *Egyptian journal of petroleum*, 27(4), 1275-1290.

Agarwal, S. K. (2006). Pozzolanic activity of various siliceous materials. *Cement and Concrete Research*, 36(9), 1735-1739.

Alercia Biga C., Arrúa P., A., Eberhardt M., & Aiassa Martinez G. (2015). Hydraulic conductivity in Loessic stabilized soil. *GEOMATE Journal*, 9(18), 1510-1514.

Al-Swaidani, A., Hammoud, I., & Meziab, A. (2016). Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(5), 714-725.

Arrúa, P., Aiassa, G., & Eberhardt, M. (2012). Loess soil stabilized with cement for civil engineering applications. *Int. J. Earth Sci. Eng*, 5(1), 10-17.

Arulrajah, A., Disfani, M. M., Horpibulsuk, S., Suksiripattanapong, C., & Prongmanee, N. (2014). Physical properties and shear strength responses of recycled construction and demolition materials in unbound pavement base/subbase applications. *Construction and Building Materials*, 58, 245-257.

Assadi-Langroudi, A., Ng'ambi, S., & Smalley, I. (2018). Loess as a collapsible soil: Some basic particle packing aspects. *Quaternary International*, 469, 20-29.

ASTM international, *Annual Book of ASTM standards*, West Conshohoken, 2022.

Bahar, R., Benazzoug, M., & Kenai, S. (2004). Performance of compacted cement-stabilised soil. *Cement and concrete composites*, 26(7), 811-820.

Baldovino, J. J., Izzo, R. L., Rose, J. L., & Domingos, M. D. (2021). Strength, durability, and microstructure of geopolymers based on recycled-glass powder waste and dolomitic lime for soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 271, 121874.

Barbour, S. L., & Fredlund, D. G. (1989). Mechanisms of osmotic flow and volume change in clay soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 26(4), 551-562.

Barcelo, L., Kline, J., Walenta, G., & Gartner, E. (2014). Cement and carbon emissions. *Materials and structures*, 47(6), 1055-1065.

Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering geology*, 42(4), 223-237.

Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E., & Bahadori, A. (2013). Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry. *Journal of cleaner production*, 51, 142-161

Black, L. (2016). Low clinker cement as a sustainable construction material. *Sustainability of Construction Materials*, 415-457.

Boardman, D. I., Glendinning, S., & Rogers, C. D. F. (2001). Development of stabilisation and solidification in lime–clay mixes. *Geotechnique*, 51(6), 533-543.

Bodor, M., Santos, R. M., Cristea, G., Salman, M., Cizer, Ö., Iacobescu, R. I., ... & Van Gerven, T. (2016). Laboratory investigation of carbonated BOF slag used as partial replacement of natural aggregate in cement mortars. *Cement and Concrete Composites*, 65, 55-66.

Budhu, M. (2020). *Soil mechanics and foundations* (No. 1, pp. 1-xvi). Wiley.

Capdevila J.A. (2008). Comportamiento tensión-deformación del loess del centro de Argentina en Campo y Laboratorio: influencia de los parámetros estructurales. Tesis doctoral.

Cardoso, R., Ribeiro, D., & Néri, R. (2017). Bonding effect on the evolution with curing time of compressive and tensile strength of sand-cement mixtures. *Soils and foundations*, 57(4), 655-668.

Chalermyanont, T., Arrykul, S., & Charoenthaisong, N. (2009). Potential use of lateritic and marine clay soils as landfill liners to retain heavy metals. *Waste Management*, 29(1), 117-127.

Chan, S. H. (1989). A review on solubility and polymerization of silica. *Geothermics*, 18(1-2), 49-56.

Chand, S., Paul, B., & Kumar, M. (2016). Sustainable approaches for LD slag waste management in steel industries: a review. *Metallurgist*, 60(1), 116-128.

Chang, J., Zhang, X., Yang Gu, Y., & yang Zhang, Y. (2021). Effects of pozzolanic reaction on carbonation degree and strength of steel slag compacts containing zeolite. *Construction and Building Materials*, 277, 122334.

Chenarboni, H. A., Lajevardi, S. H., MolaAbasi, H., & Zeighami, E. (2021). The effect of zeolite and cement stabilization on the mechanical behavior of expansive soils. *Construction and Building Materials*, 272, 121630.

Ciancio, D., Beckett, C. T. S., & Carraro, J. A. H. (2014). Optimum lime content identification for lime-stabilised rammed earth. *Construction and Building Materials*, 53, 59-65.

Cikmit, A. A., Tsuchida, T., Kang, G., Hashimoto, R., & Honda, H. (2019). Particle-size effect of basic oxygen furnace steel slag in stabilization of dredged marine clay. *Soils and Foundations*, 59(5), 1385-1398.

Consoli, N. C., Bittar Marin, E. J., Quiñónez Samaniego, R. A., Heineck, K. S., & Johann, A. D. R. (2019). Use of sustainable binders in soil stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(2), 06018023.

Consoli, N. C., Neto, A. T., Correa, B. R. S., Samaniego, R. A. Q., & Cristelo, N. (2021). Durability evaluation of reclaimed asphalt pavement, ground glass and carbide lime blends based on unconfined compression tests. *Transportation Geotechnics*, 27, 100461.

Corrêa-Silva, M., Miranda, T., Rouainia, M., Araújo, N., Glendinning, S., & Cristelo, N. (2020). Geomechanical behaviour of a soft soil stabilised with alkali-activated blast-furnace slags. *Journal of Cleaner Production*, 267, 122017.

Costantini R. A. B., Francisca, F. M., & Giomi, I. (2021). Hygrothermal properties of soil–cement construction materials. *Construction and Building Materials*, 313, 125518.

Cui, M. J., Zheng, J. J., Zhang, R. J., Lai, H. J., & Zhang, J. (2017). Influence of cementation level on the strength behaviour of bio-cemented sand. *Acta Geotechnica*, 12(5), 971-986.

da Luz García, M., & Sousa-Coutinho, J. (2013). Strength and durability of cement with forest waste bottom ash. *Construction and building Materials*, 41, 897-910.

Daraei, A., Sherwani, A. F. H., Faraj, R. H., Mohammad, S., Kurdo, S., Zare, S., & Mahmoodzadeh, A. (2019). Stabilization of problematic soil by utilizing cementitious materials. *Innovative Infrastructure Solutions*, 4(1), 1-11.

Deb, P. S., Nath, P., & Sarker, P. K. (2014). The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature. *Materials & Design (1980-2015)*, 62, 32-39.

Deloye, F. X. (1993). Hydraulicité et pouzzolanicité. *Bulletin de liaison des Laboratoires des ponts et chaussées*, 184, 94-95.

Devi, V. S., & Gnanavel, B. K. (2014). Properties of concrete manufactured using steel slag. *Procedia Engineering*, 97, 95-104.

Diao, J., Zhou, W., Ke, Z., Qiao, Y., Zhang, T., Liu, X., & Xie, B. (2016). System assessment of recycling of steel slag in converter steelmaking. *Journal of cleaner production*, 125, 159-167.

Elahi, M. M. A., Hossain, M. M., Karim, M. R., Zain, M. F. M., & Shearer, C. (2020). A review on alkali-activated binders: Materials composition and fresh properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 260, 119788.

Etim, R. K., Ekpo, D. U., Attah, I. C., & Onyelowe, K. C. (2021). Effect of micro sized quarry dust particle on the compaction and strength properties of cement stabilized lateritic soil. *Cleaner Materials*, 2, 100023.

Feiz, R., Ammenberg, J., Baas, L., Eklund, M., Helgstrand, A., & Marshall, R. (2015). Improving the CO₂ performance of cement, part I: utilizing life-cycle assessment and key performance indicators to assess development within the cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 98, 272-281.

Feng, S. J., Du, F. L., Shi, Z. M., Shui, W. H., & Tan, K. (2015). Field study on the reinforcement of collapsible loess using dynamic compaction. *Engineering geology*, 185, 105-115.

Fernández-Jiménez, A., Cristelo, N., Miranda, T., & Palomo, Á. (2017). Sustainable alkali activated materials: Precursor and activator derived from industrial wastes. *Journal of Cleaner Production*, 162, 1200-1209.

Ferreira, V. J., Vilaplana, A. S. D. G., García-Armingol, T., Aranda-Usón, A., Lausín-González, C., López-Sabirón, A. M., & Ferreira, G. (2016). Evaluation of the steel slag incorporation as coarse aggregate for road construction: technical requirements and environmental impact assessment. *Journal of Cleaner Production*, 130, 175-186.

Fisher, L. V., & Barron, A. R. (2019). The recycling and reuse of steelmaking slags—A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 146, 244-255.

Foteinis, S., Andresen, J., Campo, F., Caserini, S., & Renforth, P. (2022). Life cycle assessment of ocean liming for carbon dioxide removal from the atmosphere. *Journal of Cleaner Production*, 370, 133309.

Francisca, F. M. (2010). Comportamiento de limos loésicos contaminados con hidrocarburos estabilizados y solidificados con cemento Portland. *Boletín Geológico y Minero*, 121(2), 131-138.

Francisca, F. M., & Arrúa, P. A. (2007). Rigidez Y Resistencia De Suelos Limosos Con Propiedades Mecánicas Aleatorias. *Mecánica Computacional*, (29), 2513-1532.

Francisca, F. M., & Mozejko, C. A. (2022). Hydraulic and mechanical behavior of compacted silts modified by waste steel slag. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 100323.

Francisca, F. M., Cuestas, G. A., & Rinaldi, V. A. (1998). Estudio de permeabilidad en limos loésicos. *Encuentro de Geotécnicos Argentinos*, 1-18.

Francisca, F., Glatstein, D. A., & Nieva, P. (2009). Conductividad hidráulica de limos compactados y estabilizados con bentonita y zeolita. In *III congreso interamericano de residuos sólidos de AIDIS*.

Geiseler, J. (1996). Use of steelworks slag in Europe. *Waste management*, 16(1-3), 59-63.

Gençel, O., Karadag, O., Oren, O. H., & Bilir, T. (2021). Steel slag and its applications in cement and concrete technology: A review. *Construction and Building Materials*, 283, 122783.

Gessa-Perera, A., & González-Expósito, I. (2017). Opportunities for waste recovery to improve the carbon footprint in the Spanish cement industry under a cap and trade system: Insights from a case study. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3665-3675.

Ghisellini, P., Ripa, M., & Ulgiati, S. (2018). Exploring environmental and economic costs and benefits of a circular economy approach to the construction and demolition sector. A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 178, 618-643.

Ghobadi, M. H., Abdilor, Y., & Babazadeh, R. (2014). Stabilization of clay soils using lime and effect of pH variations on shear strength parameters. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 611-619.

Gibbs, H. J., & Holland, W. Y. (1960). Petrographic and engineering properties of loess (No. 28). Technical Information Branch, Denver Federal Center.

Gómez-Nubla, L., Aramendia, J., de Vallejuelo, S. F. O., Carrero, J. A., & Madariaga, J. M. (2017). Focused ultrasound energy over steel slags as a fast tool to assess their environmental risk before and after their reuse in agriculture and civil constructions. *Microchemical journal*, 132, 268-273.

Gonçalves, D. R., Fontes, W. C., Mendes, J. C., Silva, G. J., & Peixoto, R. A. (2016). Evaluation of the economic feasibility of a processing plant for steelmaking slag. *Waste Management & Research*, 34(2), 107-112.

Grubeša, I. N., Barisic, I., Fucic, A., & Bansode, S. S. (2016). Characteristics and uses of steel slag in building construction. Woodhead Publishing.

Gu, K., & Chen, B. (2020). Loess stabilization using cement, waste phosphogypsum, fly ash and quicklime for self-compacting rammed earth construction. *Construction and Building Materials*, 231, 117195.

Guo, J., Bao, Y., & Wang, M. (2018). Steel slag in China: Treatment, recycling, and management. *Waste management*, 78, 318-330.

Gutiérrez, A. S., Van Caneghem, J., Martínez, J. B. C., & Vandecasteele, C. (2012). Evaluation of the environmental performance of lime production in Cuba. *Journal of Cleaner production*, 31, 126-136.

Hamdi, N., & Srasra, E. (2013). Hydraulic conductivity study of compacted clay soils used as landfill liners for an acidic waste. *Waste Management*, 33(1), 60-66.

Hammond, G. P., & Jones, C. I. (2008). Embodied energy and carbon in construction materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Energy*, 161(2), 87-98.

Hammond, G., Jones, C., Lowrie, E. F., & Tse, P. (2011). Embodied carbon. The inventory of carbon and energy (ICE). Version (2.0).

Hasan, M. F., & Canakci, H. (2022). Physical-mechanical assessment of full-scale soil-cement column constructed in clayey soil. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00943.

Hasanbeigi, A., Price, L., Lu, H., & Lan, W. (2010). Analysis of energy-efficiency opportunities for the cement industry in Shandong Province, China: A case study of 16 cement plants. *Energy*, 35(8), 3461-3473.

Hezmi, M. A., Ahmad, K., Yunus, N. Z. M., Kassim, K. A., Rashid, A. S. A., & Hassan, N. A. (2019, May). Compaction characteristics of lime-treated tropical soil. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 527, No. 1, p. 012007). IOP Publishing.

Ho, L. S., Nakarai, K., Ogawa, Y., Sasaki, T., & Morioka, M. (2017). Strength development of cement-treated soils: effects of water content, carbonation, and pozzolanic reaction under drying curing condition. *Construction and Building Materials*, 134, 703-712.

Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (1981). *An introduction to geotechnical engineering* (Vol. 733). Englewood Cliffs: Prentice-Hall.

Horpibulsuk, S., Rachan, R., Chinkulkijniwat, A., Raksachon, Y., & Suddeepong, A. (2010). Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations. *Construction and building materials*, 24(10), 2011-2021.

Hozatlıoğlu, D. T., & Yılmaz, I. (2021). Shallow mixing and column performances of lime, fly ash and gypsum on the stabilization of swelling soils. *Engineering Geology*, 280, 105931.

Indiramma, P., Sudharani, C., & Needhidasan, S. (2020). Utilization of fly ash and lime to stabilize the expansive soil and to sustain pollution free environment—An experimental study. *Materials Today: Proceedings*, 22, 694-700.

James, J. (2020). Sugarcane press mud modification of expansive soil stabilized at optimum lime content: Strength, mineralogy and microstructural investigation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(2), 395-402.

Jamsawang, P., Poorahong, H., Yoobanpot, N., Songpiriyakij, S., & Jongpradist, P. (2017). Improvement of soft clay with cement and bagasse ash waste. *Construction and building materials*, 154, 61-71.

Jang, J., Narsilio, G. A., & Santamarina, J. C. (2011). Hydraulic conductivity in spatially varying media—a pore-scale investigation. *Geophysical journal international*, 184(3), 1167-1179.

Jefferson, I., Evstatiev, D., & Karastanev, D. (2008). The treatment of collapsible loess soils using cement materials. In *GeoCongress 2008: Geosustainability and Geohazard Mitigation* (pp. 662-669).

Jefferson, I., Rogers, C., Evstatiev, D., & Karastanev, D. (2005). Treatment of metastable loess soils: Lessons from Eastern Europe. In *Elsevier geo-engineering book series* (Vol. 3, pp. 723-762). Elsevier.

Juarez, M., Montoro, M.A., Francisca, F.M., 2018; “comportamiento tenso-deformaiconal de mezclas de limi-bentonita compactadas”. XXIV Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (CAMSIG) 2018, Salta, Argentina.

Kasaniya, M., Thomas, M. D., & Moffatt, E. G. (2021). Efficiency of natural pozzolans, ground glasses and coal bottom ashes in mitigating sulfate attack and alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 149, 106551.

Keppert, M., Davidová, V., Doušová, B., Scheinherrová, L., & Reiterman, P. (2021). Recycling of fresh concrete slurry waste as supplementary cementing material: Characterization, application and leaching of selected elements. *Construction and Building Materials*, 300, 124061.

Kianfar, E., & Toufigh, V. (2016). Reliability analysis of rammed earth structures. *Construction and Building Materials*, 127, 884-895.

Kianimehr, M., Shourijeh, P. T., Binesh, S. M., Mohammadinia, A., & Arulrajah, A. (2019). Utilization of recycled concrete aggregates for light-stabilization of clay soils. *Construction and Building Materials*, 227, 116792.

Kong, R., Zhang, F., Wang, G., & Peng, J. (2018). Stabilization of loess using nano-SiO₂. *materials*, 11(6), 1014.

Kourounis, S., Tsivilis, S., Tsakiridis, P. E., Papadimitriou, G. D., & Tsibouki, Z. (2007). Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag. *Cement and concrete research*, 37(6), 815-822.

Kulkarni, P. P., & Mandal, J. N. (2022). Strength evaluation of soil stabilized with nano silica-cement mixes as road construction material. *Construction and Building Materials*, 314, 125363.

Kumar, J. K., & Kumar, V. P. (2020). Soil stabilization using E-waste: a retrospective analysis. *Materials Today: Proceedings*, 22, 691-693.

Kumar, P. G., & Harika, S. (2021). Stabilization of expansive subgrade soil by using fly ash. *Materials Today: Proceedings*, 45, 6558-6562.

Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1991). *Soil mechanics* (Vol. 10). John Wiley & Sons.

Latifi, N., Eisazadeh, A., Marto, A., & Meehan, C. L. (2017). Tropical residual soil stabilization: A powder form material for increasing soil strength. *Construction and Building Materials*, 147, 827-836.

Latifi, N., Horpibulsuk, S., Meehan, C. L., Abd Majid, M. Z., Tahir, M. M., & Mohamad, E. T. (2017). Improvement of problematic soils with biopolymer—an environmentally friendly soil stabilizer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(2), 04016204.

Latifi, N., Vahedifard, F., Ghazanfari, E., & Rashid, A. S. A. (2018). Sustainable usage of calcium carbide residue for stabilization of clays. *J Mater Civ Eng*, 30(6), 04018099.

Li, P., Li, H. S., Liu, H. Q., & Wang, X. L. (2011). Application for quick lime improving strength of loess subgrade. In *Advanced Materials Research* (Vol. 168, pp. 2678-2682). Trans Tech Publications Ltd.

Li, Y., He, S., Peng, J., Xu, Q., Aydin, A., & Xu, Y. (2020). Loess geology and surface processes: An introductory note. *Journal of Asian Earth Sciences*, 200, 104477.

Liu, C., & Starcher, R. D. (2013). Effects of curing conditions on unconfined compressive strength of cement-and cement-fiber-improved soft soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(8), 1134-1141.

Liu, H. M., Wang, L. M., & Gao, P. (2014). The mechanical properties of cement reinforced loess and pore microstructure characteristics. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 527, pp. 25-30). Trans Tech Publications Ltd.

Liu, L., Zhou, A., Deng, Y., Cui, Y., Yu, Z., & Yu, C. (2019). Strength performance of cement/slag-based stabilized soft clays. *Construction and Building Materials*, 211, 909-918.

Liu, S., & Li, L. (2014). Influence of fineness on the cementitious properties of steel slag. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 117(2), 629-634.

Liu, X., Hu, M., Ke, S., Fu, C., Guo, X., & Ye, X. (2018). A novel rammed earthen material stabilized with steel slags. *Construction and Building Materials*, 189, 1134-1139.

Liu, Z., Cai, C. S., Liu, F., & Fan, F. (2016). Feasibility study of loess stabilization with fly ash-based geopolymer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(5), 04016003.

Logeshwari, J., & Sivapullaiah, P. V. (2021). Physical, chemical, morphological and strength characteristics of steel slags in view of its potential application in geotechnical engineering. *Materials Today: Proceedings*, 45, 6282-6286.

Lothenbach, B., Scrivener, K., & Hooton, R. D. (2011). Supplementary cementitious materials. *Cement and concrete research*, 41(12), 1244-1256.

Luxan, M. D., Madruga, F., & Saavedra, J. (1989). Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. *Cement and concrete research*, 19(1), 63-68.

Ma, H., & Ma, Q. (2019). Experimental studies on the mechanical properties of loess stabilized with sodium carboxymethyl cellulose. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019.

Mariri, M., Ziaie Moayed, R., & Kordnaeij, A. (2019). Stress–strain behavior of loess soil stabilized with cement, zeolite, and recycled polyester fiber. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(12), 04019291.

Martins, A. C. P., de Carvalho, J. M. F., Costa, L. C. B., Andrade, H. D., de Melo, T. V., Ribeiro, J. C. L., & Peixoto, R. A. F. (2021). Steel slags in cement-based composites: An ultimate review on characterization, applications and performance. *Construction and Building Materials*, 291, 123265.

Massazza, F. (1993). Pozzolanic cements. *Cement and Concrete composites*, 15(4), 185-214.

Mboya, H. A., King'ondy, C. K., Njau, K. N., & Mrema, A. L. (2017). Measurement of pozzolanic activity index of scoria, pumice, and rice husk ash as potential supplementary cementitious materials for Portland cement. *Advances in Civil Engineering*, 2017.

Metelková, Z., Boháč, J., Přikryl, R., & Sedlářová, I. (2012). Maturation of loess treated with variable lime admixture: Pore space textural evolution and related phase changes. *Applied clay science*, 61, 37-43.

Miraki, H., Shariatmadari, N., Ghadir, P., Jahandari, S., Tao, Z., & Siddique, R. (2022). Clayey soil stabilization using alkali-activated volcanic ash and slag. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(2), 576-591.

Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior* (Vol. 3, p. USA). New York: John Wiley & Sons.

Mitchell, J. K., Hooper, D. R., & Campenella, R. G. (1965). Permeability of compacted clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 91(4), 41-65.

Mo, L., & Panesar, D. K. (2012). Effects of accelerated carbonation on the microstructure of Portland cement pastes containing reactive MgO. *Cement and Concrete Research*, 42(6), 769-777.

Mohamed, A. A. M. S., Al-Ajamee, M., Kobbail, A., Dahab, H., Abdo, M. M., & Alhassan, H. E. (2021). A study on soil stabilization for some tropical soils. *Materials Today: Proceedings*.

MolaAbasi, H., Saberian, M., & Li, J. (2019). Prediction of compressive and tensile strengths of zeolite-cemented sand using porosity and composition. *Construction and Building Materials*, 202, 784-795.

Moll L., Rocca R. and Terzariol R (1988). Loess soils: engineering practice in Argentina. *International Conference of Special Problems on Regional Soils, Beijing, Intl. Academic Publ.* pp. 283-289.

Montoro, M. A., & Francisca, F. M. (2010). Soil permeability controlled by particle–fluid interaction. *Geotechnical and Geological Engineering*, 28(6), 851-864.

Mozejko, C. A., & Francisca, F. M. (2020). Enhanced mechanical behavior of compacted clayey silts stabilized by reusing steel slag. *Construction and Building Materials*, 239, 117901.

Mozejko, C.A., Francisca, F.M., 2018; “Caracterización mecánica de los suelos loésicos de Córdoba estabilizados con Escorias Siderúrgicas”. XXIV Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (CAMSIG) 2018, Salta, Argentina.

Mozejko, C.A., Francisca, F.M., 2021; “Estabilización mecánica-hidráulica de suelos loésicos compactados mediante la adición de escorias siderúrgicas”. XXV Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (CAMSIG) 2021, Posadas, Misiones, Argentina.

Muhs, D. R. (2013) (b). The geologic records of dust in the Quaternary. *Aeolian Research*, 9, 3-48.

Muhs, D.R., (2013) (a). Loess deposits: origins and properties. *Enciclopedia of Quaternary Science*, 2, 573-584.

Mulligan, C. N., Yong, R. N., & Gibbs, B. F. (2001). Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation. *Engineering geology*, 60(1-4), 193-207.

Musso, T. B., Francisca, F. M., Pettinari, G. R., & Roehl, K. E. (2016). Suitability of a cretaceous natural Na-bentonite as construction material for landfill liners.

Musso, T. B., Francisca, F. M., Pettinari, G. R., & Roehl, K. E. (2016). Suitability of a cretaceous natural Na-bentonite as construction material for landfill liners.

Musso, T. B., Pettinari, G., Pozo, M., Jalil, M. R., & Gil-García, R. G. (2022). A new deposit of Na-bentonite from the Upper Cretaceous Anacleto Formation (Neuquén Basin, Argentina): Characterization and properties. *Applied Clay Science*, 220, 106461.

Musso, T. B., Roehl, K. E., Pettinari, G., & Vallés, J. M. (2010). Assessment of smectite-rich claystones from Northpatagonia for their use as liner materials in landfills. *Applied Clay Science*, 48(3), 438-445.

Musso, T. D. (2011). *Minerales Arcillosos de la Región Norpatagónica para ser usados como Barreras Impermeables en la Disposición de Residuos*. Tesis Doctoral. Universidad Nacional del Comahue.

Myers, R. J., Bernal, S. A., Gehman, J. D., van Deventer, J. S., & Provis, J. L. (2015). The Role of Al in cross-linking of alkali-activated slag cements. *Journal of the American Ceramic Society*, 98(3), 996-1004.

Myers, R. J., Bernal, S. A., San Nicolas, R., & Provis, J. L. (2013). Generalized structural description of calcium–sodium aluminosilicate hydrate gels: the cross-linked substituted tobermorite model. *Langmuir*, 29(17), 5294-5306.

Naidu, P. G., Satyanarayana, P. V. V., Ganja, C. S., & Rani, K. D. (2021). Effect of cement on cement stabilized low plastic graded gravel soils. *Materials Today: Proceedings*.

O'Connor, J., Nguyen, T. B. T., Honeyands, T., Monaghan, B., O'Dea, D., Rinklebe, J., ... & Bolan, N. (2021). Production, characterisation, utilisation, and beneficial soil application of steel slag: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 419, 126478.

- Omran, A., Soliman, N., Zidol, A., & Tagnit-Hamou, A. (2018). Performance of ground-glass pozzolan as a cementitious material—A Review. *Advances in Civil Engineering Materials*, 7(1), 237-270.
- Ortiz, N., Pires, M. A. F., & Bressiani, J. C. (2001). Use of steel converter slag as nickel adsorber to wastewater treatment. *Waste management*, 21(7), 631-635.
- Pacewska, B., & Wilińska, I. (2020). Usage of supplementary cementitious materials: advantages and limitations. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 142(1), 371-393.
- Pakand, M., & Toufigh, V. (2017). A multi-criteria study on rammed earth for low carbon buildings using a novel ANP-GA approach. *Energy and Buildings*, 150, 466-476.
- Palomo, A., Grutzeck, M. W., & Blanco, M. T. (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and concrete research*, 29(8), 1323-1329.
- Pan, S. Y., Adhikari, R., Chen, Y. H., Li, P., & Chiang, P. C. (2016). Integrated and innovative steel slag utilization for iron reclamation, green material production and CO₂ fixation via accelerated carbonation. *Journal of Cleaner Production*, 137, 617-631.
- Pang, B., Zhou, Z., & Xu, H. (2015). Utilization of carbonated and granulated steel slag aggregate in concrete. *Construction and building materials*, 84, 454-467.
- Pasetto, M., Baliello, A., Giacomello, G., & Pasquini, E. (2017). Sustainable solutions for road pavements: A multi-scale characterization of warm mix asphalts containing steel slags. *Journal of Cleaner Production*, 166, 835-843.
- Pei, X., Zhang, F., Wu, W., & Liang, S. (2015). Physicochemical and index properties of loess stabilized with lime and fly ash piles. *Applied Clay Science*, 114, 77-84.
- Phoak, S., Luo, Y. S., Li, S. N., & Yin, Q. (2018). Influence of submergence on stabilization of loess in Shaanxi Province by adding fly ash. *Applied Sciences*, 9(1), 68.
- Piatak, N. M., Parsons, M. B., & Seal II, R. R. (2015). Characteristics and environmental aspects of slag: A review. *Applied Geochemistry*, 57, 236-266.

- Ponsot, I., & Bernardo, E. (2013). Self glazed glass ceramic foams from metallurgical slag and recycled glass. *Journal of cleaner production*, 59, 245-250.
- Prashanth, J. P., Sivapullaiah, P. V., & Sridharan, A. (2001). Pozzolanic fly ash as a hydraulic barrier in landfills. *Engineering Geology*, 60(1-4), 245-252.
- Pye, K. (1984). Loess. *Progress in Physical Geography*, 8(2), 176-217.
- Qi, X., Xu, Q., & Liu, F. (2018). Analysis of retrogressive loess flowslides in Heifangtai, China. *Engineering Geology*, 236, 119-128.
- Rahmat, M. N., Ismail, N., & Raffe, M. R. (2015). Strength properties of sustainable palm oil fuel ash (POFA)—Stabilized Landfill. In *Proceedings of the Colloquium on Administrative Science and Technology* (pp. 533-544). Springer, Singapore.
- Rai, A. K., Singh, G., & Tiwari, A. K. (2020). Comparative study of soil stabilization with glass powder, plastic and e-waste: A review. *Materials Today: Proceedings*, 32, 771-776.
- Rai, P., Qiu, W., Pei, H., Chen, J., Ai, X., Liu, Y., & Ahmad, M. (2021). Effect of Fly Ash and Cement on the Engineering Characteristic of Stabilized Subgrade Soil: An Experimental Study. *Geofluids*, 2021.
- Reginatto A. (1970) "Propiedades mecánicas de algunos suelos de la ciudad de Córdoba". *Memorias II R.A.M.S.I.F. Vol. 1. Córdoba*.
- Reginatto A., Ferrero J. (1974) "Causas químicas de colapso y erosión tubificada". *Memorias IV RAMSIF. San Juan: 5-00 / 5-21*.
- Reiterman, P., Mondschein, P., Doušová, B., Davidová, V., & Keppert, M. (2022). Utilization of Concrete Slurry Waste for Soil Stabilization. *Case Studies in Construction Materials*, e00900.
- Rinaldi, V. A., Cruz, M. P., Capdevila, J. A., & Clariá, J. J. (2012). Origen y caracterización de la estructuración de un loess pampeano. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*12, 60-68.

Rinaldi, V. A., Rocca, R. J., & Zeballos, M. E. (2007). Geotechnical characterization and behaviour of Argentinean collapsible loess. *Characterisation and engineering properties of natural soils*, 2259-2286.

Rinaldi, V. A., Rocca, R. J., & Zeballos, M. E. (2007). Geotechnical characterization and behaviour of Argentinean collapsible loess. *Characterisation and engineering properties of natural soils*, 2259-2286.

Saberian, M., Li, J., Perera, S. T. A. M., Ren, G., Roychand, R., & Tokhi, H. (2020). An experimental study on the shear behaviour of recycled concrete aggregate incorporating recycled tyre waste. *Construction and Building Materials*, 264, 120266.

Sadeghi, H., Kiani, M., Sadeghi, M., & Jafarzadeh, F. (2019). Geotechnical characterization and collapsibility of a natural dispersive loess. *Engineering geology*, 250, 89-100.

Santamarina, J. C., Klein, K. A., & Fam, M. A. (2001). *Soils and waves*. New York: J. Wiley & Sons.

Santos, R. M., Ling, D., Sarvaramini, A., Guo, M., Elsen, J., Larachi, F., & Van Gerven, T. (2012). Stabilization of basic oxygen furnace slag by hot-stage carbonation treatment. *Chemical Engineering Journal*, 203, 239-250.

Sarfo, P., Das, A., Wyss, G., & Young, C. (2017) (a). Recovery of metal values from copper slag and reuse of residual secondary slag. *Waste Management*, 70, 272-281.

Sarfo, P., Wyss, G., Ma, G., Das, A., & Young, C. (2017) (b). Carbothermal reduction of copper smelter slag for recycling into pig iron and glass. *Minerals Engineering*, 107, 8-19.

Seetharaman, S. (Ed.). (2005). *Fundamentals of metallurgy*. Taylor & Francis.

Shalabi, F. I., Asi, I. M., & Qasrawi, H. Y. (2017). Effect of by-product steel slag on the engineering properties of clay soils. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 29(4), 394-399.

Shan, Y., Liu, Z., & Guan, D. (2016). CO₂ emissions from China's lime industry. *Applied energy*, 166, 245-252.

Sharma, A. K., & Sivapullaiah, P. V. (2016). Ground granulated blast furnace slag amended fly ash as an expansive soil stabilizer. *Soils and Foundations*, 56(2), 205-212.

Sharma, H. D., & Reddy, K. R. (2004). *Geoenvironmental engineering: site remediation, waste containment, and emerging waste management technologies*. John Wiley & Sons.

Shen, W., Zhou, M., Ma, W., Hu, J., & Cai, Z. (2009). Investigation on the application of steel slag–fly ash–phosphogypsum solidified material as road base material. *Journal of hazardous materials*, 164(1), 99-104.

Shimobe, S., & Spagnoli, G. (2020). A novel approach to evaluating the compaction control of soils. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 53(3), 452-459.

Singh, S. R., & Panda, A. P. (1996, December). Utilization of fly ash in geotechnical construction. In *Proc. Indian Geotechnical Conf (Vol. 1, pp. 547-550)*.

Sivapullaiah, P. V., Prashanth, J. P., Sridharan, A., & Narayana, B. V. (1998). Technical Note Reactive silica and strength of fly ashes. *Geotechnical & Geological Engineering*, 16(3), 239-250.

Snehal, K., & Das, B. B. (2022). Pozzolanic reactivity and drying shrinkage characteristics of optimized blended cementitious composites comprising of Nano-Silica particles. *Construction and Building Materials*, 316, 125796.

Snellings, R., Mertens, G., & Elsen, J. (2012). Supplementary cementitious materials. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 74(1), 211-278.

Song, Q., Guo, M. Z., Wang, L., & Ling, T. C. (2021). Use of steel slag as sustainable construction materials: A review of accelerated carbonation treatment. *Resources, Conservation And Recycling*, 173, 105740.

Spagnoli, G., & Shimobe, S. (2020). An overview on the compaction characteristics of soils by laboratory tests. *Engineering Geology*, 278, 105830.

Tabarsa, A., Latifi, N., Meehan, C. L., & Manahiloh, K. N. (2018). Laboratory investigation and field evaluation of loess improvement using nanoclay–A sustainable material for construction. *Construction and Building Materials*, 158, 454-463.

Terzariol, R. (2010). LA INGENIERÍA GEOTECNICA EN ARGENTINA EN EL PERIODO ANTERIOR A 1925: SEGUNDA PARTE. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 10(1).

Tironi, A., Trezza, M. A., Scian, A. N., & Irassar, E. F. (2013). Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays. *Cement and Concrete Composites*, 37, 319-327.

Tong, Z., Ma, G., Zhang, X., Liu, J., & Shao, L. (2018, March). Leaching and carbonation of electric arc furnace (EAF) slag under a microwave field for mineral carbonation. In *TMS Annual Meeting & Exhibition* (pp. 179-190). Springer, Cham.

Topkaya, Y. A. V. U. Z., Sevinc, N., & Günaydın, A. (2004). Slag treatment at Kardemir integrated iron and steel works. *International journal of mineral processing*, 74(1-4), 31-39.

Touze-Foltz, N., Xie, H., & Stoltz, G. (2021). Performance issues of barrier systems for landfills: a review. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(2), 475-488.

Tsakiridis, P. E., Papadimitriou, G. D., Tsvivilis, S., & Koroneos, C. (2008). Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. *Journal of hazardous materials*, 152(2), 805-811.

Uzal, B. U. R. A. K., Turanlı, L., Yücel, H. A. M. D. U. L. L. A. H., Göncüoğlu, M. C., & Çulfaz, A. (2010). Pozzolanic activity of clinoptilolite: A comparative study with silica fume, fly ash and a non-zeolitic natural pozzolan. *Cement and Concrete Research*, 40(3), 398-404.

Van Oss, H. (2013). *2011 Minerals Yearbook: Slag-Iron and Steel*.

Walker, R., & Pavía, S. (2011). Physical properties and reactivity of pozzolans, and their influence on the properties of lime–pozzolan pastes. *Materials and structures*, 44(6), 1139-1150.

Wanare, R., Jayanthi, P., & Iyer, K. K. (2022). A study on cracking behavior of marine soil modified with ultrafine slag under cured and uncured conditions. *Materials Today: Proceedings*.

Wang, D., Chang, J., & Ansari, W. S. (2019). The effects of carbonation and hydration on the mineralogy and microstructure of basic oxygen furnace slag products. *Journal of CO2 Utilization*, 34, 87-98.

Wang, D., Tawk, M., Indraratna, B., Heitor, A., & Rujikiatkamjorn, C. (2019). A mixture of coal wash and fly ash as a pavement substructure material. *Transportation Geotechnics*, 21, 100265.

Wang, Q., Yang, J., & Yan, P. (2013). Cementitious properties of super-fine steel slag. *Powder technology*, 245, 35-39.

Wiedmann, T., & Minx, J. (2008). A definition of 'carbon footprint'. *Ecological economics research trends*, 1(2008), 1-11.

Xu, J., Wu, Z., Chen, H., Shao, L., Zhou, X., & Wang, S. (2022). Influence of dry-wet cycles on the strength behavior of basalt-fiber reinforced loess. *Engineering Geology*, 106645.

Yi, H., Xu, G., Cheng, H., Wang, J., Wan, Y., & Chen, H. (2012). An overview of utilization of steel slag. *Procedia Environmental Sciences*, 16, 791-801.

Yi, Y., Gu, L., & Liu, S. (2015). Microstructural and mechanical properties of marine soft clay stabilized by lime-activated ground granulated blastfurnace slag. *Applied Clay Science*, 103, 71-76.

Yildirim, I. Z., & Prezzi, M. (2011). Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. *Advances in civil engineering*, 2011.

Yu, C., Cui, C., Wang, Y., Zhao, J., & Wu, Y. (2021). Strength performance and microstructural evolution of carbonated steel slag stabilized soils in the laboratory scale. *Engineering Geology*, 295, 106410.

Yu, H., Yi, Y., Romagnoli, A., & Tan, W. L. (2022). Cement soil stabilization for underground liquid natural gas storage. *Cold Regions Science and Technology*, 194, 103438.

Yüksel, İ. (2017). A review of steel slag usage in construction industry for sustainable development. *Environment, Development and Sustainability*, 19(2), 369-384.

Zárate M.A. (2003). Loess of southern South America. *Quaternary Science Reviews*, Vol. 22, pp. 1987-2006.

Zárate, M. (2007). South American loess record. *Encyclopedia of quaternary science*. Berlin: Elsevier, 1466-79.

Zhang, C. L., Jiang, G. L., Su, L. J., & Zhou, G. D. (2017). Effect of cement on the stabilization of loess. *Journal of Mountain Science*, 14(11), 2325-2336.

Zhang, M., Guo, H., El-Korchi, T., Zhang, G., & Tao, M. (2013). Experimental feasibility study of geopolymers as the next-generation soil stabilizer. *Construction and Building Materials*, 47, 1468-1478.

Zhang, X., Li, W., Tang, Z., Wang, X., & Sheng, D. (2020). Sustainable regenerated binding materials (RBM) utilizing industrial solid wastes for soil and aggregate stabilization. *Journal of Cleaner Production*, 275, 122991.

Zhang, X., Ma, G., Tong, Z., & Xue, Z. (2017). Microwave-assisted selective leaching behavior of calcium from Basic Oxygen Furnace (BOF) slag with ammonium chloride solution. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 53(2), 139-146.

Zhang, Y., Johnson, A. E., & White, D. J. (2019). Freeze-thaw performance of cement and fly ash stabilized loess. *Transportation Geotechnics*, 21, 100279.

Zhao, J., Yan, P., & Wang, D. (2017). Research on mineral characteristics of converter steel slag and its comprehensive utilization of internal and external recycle. *Journal of Cleaner Production*, 156, 50-61.

Zhou, Y. F., Tham, L. G., Yan, W. M., Dai, F. C., & Xu, L. (2014). Laboratory study on soil behavior in loess slope subjected to infiltration. *Engineering Geology*, 183, 31-38.